



Máster en Ingeniería Acústica de la Edificación y Medio Ambiente

Trabajo Fin de Máster		
Título	Construcción y optimización de un sound system	
Autor	Lino Martínez Varela	VºBº
Tutor	Francisco Aznar Ballesta	
Ponente		
Tribunal		
Presidente	José Luis Sánchez Bote	
Secretario	Lino García Morales	
Vocal	Juan José Gómez Alfageme	
Fecha de lectura		
Calificación		

El Secretario:

Construcción y optimización de un sound system

Autor: Lino Martínez Varela

Tutor: Francisco Aznar Ballesta

Julio de 2014

Agradecimientos:

A todas las personas que han participado en el de una forma u otra, a Rodrigo Moral y Carlos Revilla por haberme ayudado y prestado su taller durante días en la construcción de los MT-130, a todo el colectivo de Trapecio y en general a Tabacalera por haber cedido sus herramientas y espacios y a toda su gente por haberme enseñado tanto durante los meses que estuve construyendo el Cubo. A Kasimiro por que va a disfrutar mucho este equipo aunque no haya podido estar presente en la construcción y por supuesto a todos los integrantes de Jamaika in the Jungle que son demasiados para nombrarlos aquí ya que este sound system es para ellos, es una forma de darles las gracias por todos estos años apoyando este proyecto y para que sigan muchos muchos años más bailando y la familia siga creciendo. A los integrantes de Movimiento por la Cultura Libre en especial a Pablo Simón por haber prestado su coche constantemente para mover maderas y altavoces de un sitio a otro. Antonio de Damping y a Luis de Otix dos de las personas que más conocimientos me han transmitido para poder realizar este proyecto. A mi familia por que sin ellos no sería posible hacer nada de esto. A Jose Luis Sánchez Bote por dedicarme parte de su tiempo, y a mi tutor Francisco Aznar Ballesta por aceptar este proyecto y tener paciencia durante todos los primeros meses que estuve construyendo y durante estos últimos días.

Índice

Índice	iii
Índice de figuras	vi
Resumen	ix
Summary	xx
1 Introducción	1
1.1. Sound System	3
1.2. Cajas de graves	4
1.3. Filtrado	8
1.3.1. Elección del sistema de filtrado	8
2 Construcción	11
2.1. Materiales	12
2.1.1. La Madera	12
2.2. Montaje	16
2.2.1. Pasos	16
2.2.1. Unión de piezas	18
2.2.2. Refuerzos anti vibración	20
3 Caja de graves	21
3.1. Caja de graves. Cubo 18	22
Cubo 18 vs Cubo Extended	22
Elección del cono	23

3.2. Respuesta en frecuencia	24
Material absorbente	24
Posición del altavoz	26
Medida de la frecuencia a la que actúa la bocina.	27
4 Caja de medios agudos	31
4.1.1. Elección del cono y del motor	33
4.1.2. Protección de Agudos	33
4.2. Caracterización de Medios	35
Respuesta en frecuencia	35
Directividad	36
5 Sistema Completo	39
5.1. Filtrado	41
5.1.1. Elección del tipo de filtro	41
5.1.2. Elección de las frecuencias de cruce	42
5.1.3. Alineamiento de fase	46
5.1.4. Ecualización	51
6 Conclusiones y líneas futuras	54
6.1. Conclusiones	55
6.2. Líneas Futuras	56
7 Planos	58
7.1. Planos y vistas del Cube18	59



7.2. Planos y vistas MT-130	60
7.3. Coste del Material	62
Referencias bibliográficas	63

Índice de figuras

Figura 1. (Negro) Curva de impedancia típica de un sistema bass réflex (Rojo) Curva de impedancia de un altavoz.	5
Figura 2. (a) caja de 4º orden (b) caja de 6º orden	6
Figura 3. Diferentes vistas del Behringer Ultradrive Pro DCX2496	10
Figura 4. Presentación de la caja antes de pegar las piezas	17
Figura 5. Pegado de la primera pieza de la caja de medios	18
Figura 6. (a) Fresadora (b) pestaña para atornillar el altavoz	20
Figura 7. (Rojo) respuesta en frecuencia de la caja sin absorbente (Verde) respuesta en frecuencia de la caja con absorbente.	25
Figura 8. (Rojo) respuesta en frecuencia de la caja con el imán dentro de la cámara (Verde) respuesta en frecuencia de la caja con el imán fuera de la cámara.	26
Figura 9. (Roja) Caja completa, (Verde) Solo bocina , (Negra) Bocina tapada.	28
Figura 10. Impedancia eléctrica de entrada del altavoz cargado en la caja cubo 18.	29
Figura 11. (Rojo) Funcionamiento sin bocina (Verde) funcionamiento con bocina	30
Figura 12. Modelos MT: de izquierda a derecha Mt121, Mt130, Mt102	32
Figura 13. (Rojo) Medida realizada en la boca de la bocina de medios, (Verde) Medida realizada a 2m de la caja, (Negro) Medida realizada en la garganta de la bocina	36
Figura 14. Precision Turntable LT 360.	37
Figura 15. Gráfica donde se muestra la directividad del MT-130 para 500Hz, 1K, 2K, 3K, 4K, 8K, 16K.	37

Figura 16. Foto de la disposición del sistema de sonido en la posición final sobre la que se han realizado las medidas del sistema completo. 40

Figura 17. (Rojo) Vía de graves sin filtro, (Negro) vía de medios sin filtro, (Verde) Sistema completo con $f_1=180\text{Hz}$ 43

Figura 18. (Rojo) Vía de graves sin filtro, (Negro) vía de medios sin filtro, (Verde) Sistema completo con $f_1=124\text{Hz}$ 43

Figura 19. (Rojo) sistema completo para $f_1=180\text{Hz}$, (Verde) Sistema completo para $f_1=124\text{Hz}$. 44

Figura 20. (Rojo) Vía de agudos sin filtro, (Negro) vía de medios sin filtro, (Verde) Sistema completo con $f_2=859\text{Hz}$ 45

Figura 21. (Verde) Vía de graves filtrada, (Rojo) vía de medios filtrada, (Negro) vía de agudos filtrada 46

Figura 22. (Verde) respuesta en fase del sistema para $f_1=180\text{Hz}$ sin retardo, (Rojo) respuesta en fase del sistema para $f_1=180\text{Hz}$ con retardo (3,35ms) 47

Figura 23. (Rojo) respuesta del sistema para $f_1=180\text{Hz}$ sin retardo, (Verde) respuesta del sistema para $f_1=180\text{Hz}$ con retardo (3,35ms). 48

Figura 24. (Verde) respuesta en fase del sistema para $f_1=124\text{Hz}$ sin retardo, (Rojo) respuesta en fase del sistema para $f_1=124\text{Hz}$ con retardo (4,08ms). 48

Figura 25. (Rojo) respuesta del sistema para $f_1=124\text{Hz}$ sin retardo, (Verde) respuesta del sistema para $f_1=124\text{Hz}$ con retardo (4,08ms). 49

Figura 26. (Rojo) respuesta del sistema para $f_1=180\text{Hz}$ después del ajuste, (Verde) respuesta del sistema para $f_1=124\text{Hz}$ después del ajuste. 50

Figura 27. (Verde) respuesta del sistema para $f_2=859\text{Hz}$ antes del ajuste, (Rojo) respuesta del sistema para $f_2=859\text{Hz}$ con retardo (0,43ms). 51

Figura 28. (Rojo) respuesta del sistema sin ecualizar, (Verde) respuesta del sistema ecualizado. 52

Figura 29. Respuesta final del sistema. 53

Figura 30. Planos a partir de los que se realizó Cube 18, las medidas dadas en cm. 59

Figura 31. Despiece Cube 18, medidas dadas en cm. 59

Figura 32. Diferentes vistas MT-130 60

Figura 33. Planos MT-130 60

Figura 34. Despiece en Sketchup MT-130 61

Resumen

Este proyecto consiste en la construcción de un sistema de sonido artesanal de 3 vías, su posterior estudio y su puesta a punto. El proyecto está concebido como una estudio teórico – práctico de un sistema de sonido que en particular servirá como base para la realización de una serie de talleres titulados “Construcción de un sound system”. Por lo que no pretende ser un extenso estudio sobre el sistema si no una guía donde se detallan los aspectos más importantes y a su vez entendibles a un amplio público. Se explican los principales modelos de cajas existentes, los aspectos más importantes de la construcción junto con un breve compendio de los materiales necesarios y los diferentes tipos de madera. Incluye también una evaluación de todas las partes del sistema con sus pros y sus contras, y finalmente un estudio donde se evalúa el comportamiento final del sistema. Por último se muestra la optimización del sistema además de las conclusiones y líneas futuras del proyecto.

Summary

The project is about a self-construction three way sound system, further study and the tuning of the system. The project is conceived like a theoretical and practical study of a particular system which serve to develop a series of workshops titled "*Sound system construction*". That's why is not intended to be a deep study of the system, if not a guide where the most important aspects are detailed and at the same time understandable for a non experts audience. The main acoustics boxes are explained as the more important construction aspects, together with a summary of the materials needed and the different types of wood. Evaluations of the different parts of the systems are included with their pros and cons, and finally a study where the final behaviour of the system is evaluated. Finally is showed how to optimize it, in addition to the conclusion and future lines of investigation.

1

Introducción

El proyecto consiste en la construcción de un sistema de sonido artesanal de 3 vías, su posterior estudio, y puesta a punto del sistema. La realización de este proyecto surge como necesidad a la hora de sonorizar diferentes actividades llevadas a cabo por la asociación cultural sin ánimo de lucro Movimiento por la Cultura Libre en colaboración con otra asociación burgalesa llamada Anomalía. Movimiento por la Cultura Libre *MCL*, necesitaba un equipo de sonido para poder sonorizar eventos, actuaciones, y sobre todo para sonorizar una de las áreas dentro del *Encuentro Internacional de Música What Is Music? "WIM2014"*[1]. Entre los valores y objetivos de *MCL* está la autosuficiencia y la ruralización de ciertos aspectos de nuestra vida cotidiana entre ellos uno de los más importantes, la cultura.

Por eso desde el primer momento tuvimos claro que el sistema de sonido debería ser artesanal. Otro de los aspectos importantes a la hora de desarrollar el sistema que íbamos a construir es que este no debería ser excesivamente grande y pesado, las actividades y público al que va dirigido en ningún momento se espera sea multitudinario. Por ello un sistema de 3 vías de 18", 12" y 1" se conformó como posible solución a las necesidades de *MCL*.

Con el objetivo de promover la cultura y el conocimiento, principales objetivos de *MCL*, el desarrollo de este proyecto final de máster se centra en poder adaptar este trabajo a un formato taller teórico- práctico.

El primer taller se desarrollará durante los 10 días que dura el encuentro *WIM2014* [1], y tendrá como duración 3 sesiones de 3 horas cada una en las que se pretende explicar de manera introductoria a los asistentes el proceso de construcción de un sistema de sonido "*sound system*" artesanal. A partir de ésta última sesión comenzará la construcción de una caja de graves como la del proyecto, que quedará terminada a finales del encuentro para completar el resto del *sound system*. Los asistentes en principio serán músicos o aficionados a la música de entre unos 25 a 45 años, personas que aunque siempre han estado en contacto con el sonido carecen de conocimientos básicos sobre acústica, por ello el proyecto no ahonda en el diseño de estas cajas si no en la construcción y puesta a punto de un sistema. Permitirá a los asistentes tener los conocimientos necesarios para reproducir este mismo sistema o similar una vez terminado el taller.

1.1. Sound System

Existen diferentes tipos de sound systems diferenciados entre sí por el modelo de cajas utilizadas, la disposición éstas, la forma de controlarlas y el número de vías que las componen. Una de las principales características que más pueden marcar el sonido final de un sound system es el número de vías que se elija. Lo más normal es encontrarnos con sistemas de 2, 3 o 4 vías.

En sistema de 2 vías, el espectro de frecuencias es radiado entre dos conos, la ventaja de estos sistemas es que su configuración suele ser más simple ya que solo hay que elegir un punto de corte entre las dos vías. Por el contrario la elección de los conos debe ser más rigurosa pues el rango de frecuencias que deberá abarcar cada uno es mayor. El altavoz de graves-medios deberá reproducir frecuencias elevadas y el motor de agudos frecuencias más graves. La elección de buenos componentes es muy importante a la hora de disminuir en la medida de lo posible una coloración excesiva.

En sistemas de 3 vías existe una mayor dedicación de cada vía al rango de frecuencias que le corresponde, evitando así que los componentes tengan que reproducir partes del espectro en las que se encuentran más *'forzados'*. Por otra parte al haber 3 vías existen 2 puntos de corte o frecuencias de cruce diferentes. En sistemas donde no se tenga un control absoluto sobre la frecuencia de cruce, tipo de filtro, pendiente o corrección de fase se traduce en una pérdida de la respuesta del sistema en estos puntos de cruce entre vías. Por lo tanto un sistema de 3 vías desde este punto de vista no hará sino empeorar la respuesta final ya que en vez de un punto de cruce tendremos dos y es muy probable que estén situados en frecuencias de cuya buena reproducción dependa la sensación final del sistema.

En un sistema de 4 vías ocurre exactamente lo mismo, si no tenemos la forma de configurarlo correctamente el resultado será peor, pero con una buena configuración y filtrado los sistemas de 4 vías suelen añadir una vía extra de sub-graves, que da una gran presencia al resultado final.

Nuestro sound system consiste en un sistema de 3 vías compuesto por dos cajas de graves con dos conos Beyma 18P80Nd (2x800W), dos cajas de medios-agudos con dos conos de 12" Profesional Devices 121 (2x300W) y dos motores Beyma de 1" CD10FE (2x70W) con bocina beyma TD-164 adaptada para este motor.

Cada vía va alimentada por una etapa de potencia de forma individual y todo esto controlado mediante un procesador/crossover digital Behringer Ultradrive pro dcx2496 que distribuye y optimiza la señal de audio.

El equipo está distribuido de esta manera (número de cajas pares) para poder actuar en estéreo, o en mono disponiendo el equipo en forma de “*pirámide*” al estilo de las antiguas sound systems artesanales de los 70's [2].

El sistema bajo estudio en este proyecto se compone únicamente de la mitad de este equipo, ya que una vez configurado nuestro procesador es capaz replicar la configuración del sistema para que funcione en stereo.

Además de todo esto se deja una puerta abierta para ampliar el sound system introduciendo una vía más que la constituirían dos cajas con dos altavoces de 15” cada una.

1.2. Cajas de graves

Lo más importante antes de empezar a construir cualquier caja es tener claro que sonido se quiere. Es necesario estudiar previamente que es lo que cada diseño de caja puede darnos y de que manera. Después elegiremos la que más se aproxime a nuestras expectativas sin que necesariamente tenga que ser una de ellas sino alguna que combine características de varios modelos, lo que se denominan modelos híbridos. A continuación se enumeran diferentes posibilidades de cajas de graves:

Caja sellada

Una caja cerrada herméticamente supone un aumento en la rigidez de la suspensión y la frecuencia de sintonía (F_b) aumenta. Esta frecuencia de sintonía corresponde con la frecuencia de resonancia del altavoz. En una caja abierta F_b disminuye debido a que la masa de aire contenida en la caja actúa de lastre y F_b baja.

Por lo tanto con una caja sellada nos será más difícil llegar a reproducir muy bajas frecuencias debido al aumento de la F_b no obstante ganamos entro tipo de factores como el comportamiento frente a transitorios.

Bass réflex

Es el tipo de caja más extendido, junto a la caja sellada. Consiste en una caja cerrada parcialmente, pero con un tubo con salida al exterior denominado bass reflex.

En el caso de una caja cerrada, la emisión acústica producida por la parte trasera de la membrana, se pierde en forma de calor a través del material absorbente. La caja bass-reflex tiene por objeto recuperar una parte de esta energía. En la caja existe una abertura llamada respiradero que se produce a través de un tubo.

Existen tres elementos principales, el altavoz, el aire comprendido en el respiradero que actúa como una masa, y el volumen de aire comprendido en la caja que separa estas dos actuando como un muelle.

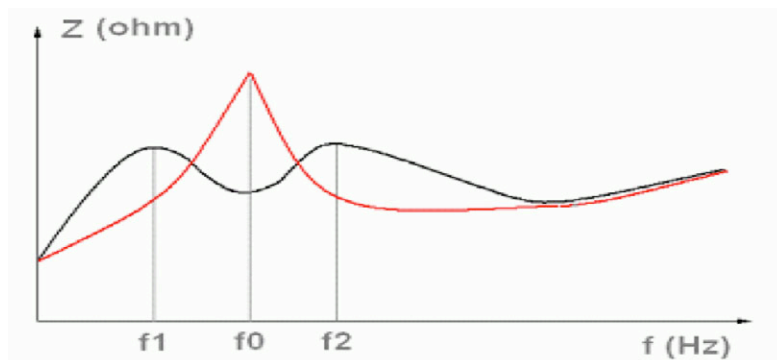


Figura 1. (Negro) Curva de impedancia típica de un sistema bass réflex (Rojo) Curva de impedancia de un altavoz.

El campo sonoro generado en la abertura de la caja a la frecuencia f_2 está en fase con el campo sonoro generado por la membrana del altavoz; a la frecuencia f_0 ambos están desfasados 90° y a la frecuencia f_1 , están en oposición de fase.

Haciendo variar el volumen de la caja y las dimensiones del respiradero, la longitud del tubo y su forma será posible optimizar las características de nuestra caja y sintonizarla a una determinada frecuencia[8].

Las ventajas son una eficiencia mayor, una extensión en graves y su capacidad para manejar grandes niveles sin distorsión.

Los problemas que aparecen en este tipo de caja son que la pendiente de atenuación es muy alta, y que cuando se trabaja por debajo de la frecuencia de corte de la caja, el aire contenido en el conducto ya no actúa como resistencia, y el altavoz

es como si estuviese funcionando al aire libre. La respuesta temporal es peor que la de una caja cerrada [6].

Caja con radiador pasivo

Es una variante de la caja bass-reflex. Consiste en una caja bass-reflex en la que se ha sustituido la apertura por un radiador pasivo. Un radiador pasivo es como un altavoz, pero sin imán y sin bobina. Sólo tiene el chasis, la suspensión y el diafragma. Su misión es dejar pasar a los graves que se crean en el interior de la caja. Se trata de hacer que el radiador pasivo ofrezca la misma resistencia al aire que la apertura de un sistema bass-reflex. Para esto, se le añade masa [6].

El rendimiento de estas cajas es menor que los bass-reflex. Las ventajas son las mismas que en las cajas bass-reflex, y en los inconvenientes hay que añadir el precio del radiador.

Caja paso-banda

Consisten en una caja con una pared interior donde está el woofer. En uno de los lados hay una sub-caja bass-reflex y en el otro, puede haber un bass-reflex (caja de 6º orden) o una caja sellada (4ºorden).

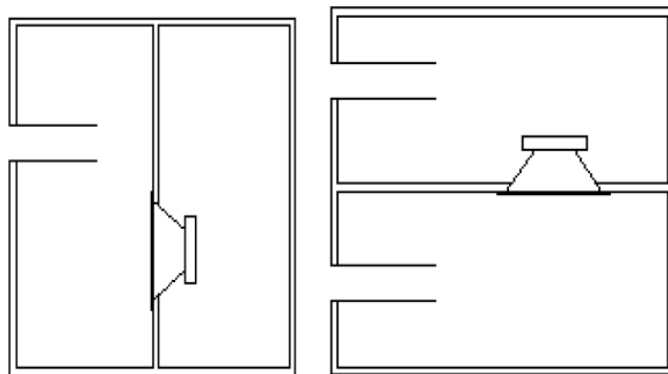


Figura 2. (a) caja de 4º orden (b) caja de 6º orden

Este tipo de caja sólo deja salir el sonido por el conducto. La respuesta del conducto es un filtro paso banda con pendientes de 24dB/oct en ambos lados.

Este es el motivo de que se llame paso-banda. Las cajas deben estar muy bien construidas porque la presión en el interior es muy grande, y además se debe evitar que el sonido del interior salga al exterior a través de las paredes y del propio tubo.

Otro efecto muy pernicioso es que la sub-caja propiamente dicha es un resonador de Helmholtz, y es habitual tener la impresión de que sólo se oye una frecuencia.

Con un altavoz con una frecuencia de resonancia $F_s = 40\text{Hz}$ se puede llegar a una $F_b = 25\text{Hz}$, lo que proporciona una extensión en graves muy importante.

Como inconvenientes, la eficiencia baja y la respuesta temporal es mala, la señal sufre retrasos muy altos. El/los tubos tienen su propia frecuencia de resonancia y pueden colorear el sonido.

Altavoz en pantalla infinita

Todas las cajas anteriores tratan de hacer "algo" con la onda producida por la parte interior del altavoz, aprovechándola o eliminándola. Este tipo de "caja" no hace nada con ella. Consiste en una tabla con un agujero donde va situado el woofer, y su única función es impedir el cortocircuito acústico.

A diferencia de los otros tipos de caja, esta no tiene ningún problema de resonancia, ya que no hay paredes contra las que pueda resonar. La consecuencia es que el sonido es muy puro, no da sensación de compresión como en las otras.

F_s permanece inalterada, y $F_b = F_s$. Como si estuviese sonando al aire libre pero sin cortocircuito acústico. El problema es que el tablero necesario para impedir el cortocircuito acústico puede ser muy grande.

Línea de transmisión

Es uno de los mejores tipos de caja, pero no se han encontrado los materiales adecuados que permitan "plegarla" y que no ocupe tanto, manteniendo todas sus características.

Contribuye a reforzar las bajas frecuencias poniendo en fase a las ondas trasera y delantera del diafragma.

Tiene muchas ventajas, es una caja teóricamente libre de ondas estacionarias, puede manejar cómodamente grandes SPL, y no se llega a sobrepasar la excursión máxima de la membrana tan fácilmente como en los bass-reflex. Su respuesta temporal es muy buena y crea poca distorsión a alto SPL. La extensión en graves es muy buena.

El principal inconveniente es que el tamaño de las cajas es muy grande, este es el motivo por el que prácticamente no son comercializadas

1.3. Filtrado

1.3.1. Elección del sistema de filtrado

Un sistema controlado mediante filtrado pasivo incorpora los filtros dentro de las propias cajas, filtrando la señal una vez ha sido amplificada. El uso de este sistema incorpora un sobre peso en las cajas de graves ya que un filtro paso bajo necesita un bobinado largo. Por otra parte un filtrado pasivo no nos permite en un futuro controlar la frecuencia de corte de cada una de nuestros altavoces. Si en un futuro queremos añadir alguna vía o cajas extra nuestro sistema. Por otra parte un sistema con filtrado pasivo nos da más seguridad ya que en el caso de las cajas de agudos pueden sufrir mucho incluso romperse si la señal que reciben no ha sido filtrada correctamente de forma previa.

Un filtrado activo filtra la señal antes de ser amplificada por lo que hay que tener más en cuenta que tipo de señal estamos enviando a cada uno de nuestros altavoces y esto requiere un poco más de esfuerzo y metodología a la hora de manejar un equipo. Por el contrario se gana en versatilidad y sobre todo nos da la oportunidad de configurarlo utilizando un número mayor de parámetros.

En nuestro caso, el sistema será controlado mediante un filtrado activo. A la hora de elegir que tipo de solución iba a controlar todo el sistema se barajaron tres

posibles opciones, un crossover pre amplificado *preamp*, un crossover analógico, o un procesador digital.

La inmensa mayoría de sound systems profesionales utilizados en la actualidad incorporan un preamp dentro de su sound system. Principalmente si incluyen una señal adicional a la que se está reproduciendo como un cantante o algún instrumento en solitario. La principal diferencia entre un preamp y un crossover analógico es que el primero además de las funciones de un crossover incluye una serie de controles adicionales y canales que lo convierten prácticamente en una mesa de mezclas. La versatilidad y juego en directo de un preamp no es comparable a ninguna de las otras dos soluciones. Aún así se ve limitado en cuanto al tratado de la señal, pues quitando las funciones que incorpora una mesa de mezclas estándar, no aporta nada que no tenga un crossover analógico convencional.

El precio de estos preamps es un factor muy a tener en cuenta ya que su precio puede doblar o triplicar el de un crossover analógico convencional.

El crossover analógico además de permitir aplicar un filtrado sin necesidad de tener que convertir la señal a digital, nos permite la modificación de parámetros en directo sin cortes en la señal, lo que nos permite jugar con el sistema en actuaciones, modificando sus ganancias, activando y desactivando diferentes vías en momentos puntuales, etc. En general en la historia del sound system todos estos equipos venían controlados por crossovers analógicos. No obstante la capacidad de operación y configuración del sistema es bastante reducida.

Un procesador digital presenta el inconveniente de pasar la señal de audio una vez más por otro proceso de conversión. De todas formas es difícil no caer rendido a todas las posibilidades que nos ofrecen. Ecualizadores, compresores, limitadores etc... El uso de un procesador digital nos permite configurar nuestro sistema prácticamente a nuestro antojo, permitiéndonos en un futuro añadir o quitar altavoces a nuestro PA, realizar instalaciones grandes donde nos sea preciso introducir retardos, alinear la fase de nuestros altavoces y todo esto tan solo en unos segundos. Por el contrario su modificación en directo está muy limitada y tan solo nos permite jugar con algunos parámetros sin que el flujo de la señal se vea afectada.

Al final nos decantamos por un crossover procesador digital de Behringer modelo Ultradrive Pro DCX2496, figura 3.



Figura 3. Diferentes vistas del Behringer Ultradrive Pro DCX2496

Este procesador consta de 3 entradas y 6 salidas las cuales pueden ser configuradas prácticamente de cualquier manera. Permite incorporar 6 tipos de filtros diferentes a cada entrada y salida del procesador, además de ecualización paramétrica, ecualización dinámica, compresores, limitadores, ajuste de los retardos y ganancia. Permite controlar todos estos parámetros mediante su pantalla y además todo esto puede ser controlado por software mediante una entrada digital. Su entrada de red también permite interconectar varios procesadores en serie.

2

Construcción

2.1. Materiales

En este capítulo se presenta el estudio realizado sobre diferentes opciones que existen a la hora elaborar una caja, las diferentes herramientas y materiales que intervienen en la construcción y una explicación detallada sobre los pasos seguidos durante todo el proceso de construcción del sistema que se ha realizado.

2.1.1. La Madera

Las principales características que se le pide un material para construir la caja de un altavoz es que su **densidad, resistencia y dureza** sean altas.

Densidad: una mayor densidad, significa una alta relación masa/volumen, un sistema construido con materiales de alta densidad pesará más y por lo tanto tendrá un comportamiento más estable disminuyendo las vibraciones. Permitirá radiar el sonido por donde se quiere sin tener pérdidas lo que aumenta la eficiencia de la caja

Resistencia: sobre todo tratándose de sistemas que van a ser frecuentemente transportados y con mucho uso en exteriores, la resistencia del material es esencial para soportar golpes, y sobre todo inclemencias meteorológicas como la lluvia.

Dureza: un material duro tiene una oposición a ser deformado y por lo tanto un mejor comportamiento frente a vibraciones.

Además de construir una caja sólida y firme uno de los principales objetivos es tratar de conseguir que el material que utilicemos no aporte ningún tipo de coloración, como esto es imposible se pretende que al menos sea una coloración natural y no disonante [3]. En parte esto es debido a algunos materiales absorben algunas frecuencias y pueden llegar a reforzar otras, produciendo todo este tipo de coloraciones, lo mismo ocurre con las dimensiones de la caja y la forma.

Aglomerado

En cajas de gama baja y no tan baja se ha venido utilizando durante tiempo el aglomerado (mezcla encolada de virutas de madera). La principal característica del aglomerado es su bajo precio, aunque por el contrario tenemos que decir que tienen

una densidad excesivamente baja y que son maderas difíciles de trabajar con ellas. No tienen resistencia, las uniones entre piezas no quedan bien selladas y no resisten inclemencias meteorológicas.

Existen aglomerados de 20 y 30 cm que están contruidos con colas más resistentes y que por lo tanto aportan una mayor dureza y densidad pero se hace difícil muchas veces trabajar con maderas de este grosor.

DM

Una de las opciones más utilizadas es la madera de densidad media también conocido como DM. Se compone de virutas muy finas de madera encoladas y muy prensadas en todas las direcciones. Este material tiene buenas propiedades mecánicas y gran estabilidad en todas sus direcciones, una dureza y rigidez por el contrario su densidad es baja lo que nos obliga a utilizar espesores más grandes si queremos un buen aislamiento. Además este material no está preparado para inclemencias meteorológicas. Otro inconveniente, es que como todas las maderas su comportamiento no es perfectamente homogéneo y lineal respecto a la frecuencia. Tiende a resonar o a reducir su absorción del sonido alrededor de 200-400 Hz. Muchas cajas sufren este problema, ya que esas frecuencias no se atenúan con los materiales que se usan habitualmente (lanas, fibra de vidrio...).

El hecho de que el DM no sea madera en sí, también dificulta y hace complicado el trabajo manual con este material, cuando cortamos o lijamos la madera esta no se deshace en forma de viruta si no de polvo. Este polvo perjudica a la salud al tratarse de una mezcla de cola y polvo de madera, lo que hace necesario el uso de mascarillas. Uno de los factores muy a tener en cuenta es su precio reducido, por debajo del de cualquier madera.

Muchos constructores de cajas [4] coinciden en que las construcciones con DM dejan el rango de los 300Hz desatendido. Gran parte del cuerpo del sonido se encuentra en esta frecuencia lo que produce una falta expresividad y firmeza en el sonido final.

Madera maciza

La madera maciza en general aporta una densidad mucho más elevada en comparación con el DM y el resto de maderas laminadas además de una gran dureza. No existe una regla común a las maderas macizas ya que todo depende del tipo de madera que estemos utilizando. Algunas de las maderas más densas son el iroco, el ébano, el cerezo... No obstante el precio de las planchas de madera es muchas veces excesivamente caro en comparación con algunas de las mejoras que pueden aportar respecto a otros materiales.

Una de las condiciones básicas antes de empezar a construir la caja es que la madera debe estar completamente seca. Por otra parte una de las principales características de la madera maciza es que va asentándose y amoldándose una vez construida la caja, lo que puede aportar mayor estabilidad y robustez a la caja ya que las piezas quedan fuertemente unidas, esto se debe que la madera maciza es más maleable que el DM o el laminado.

Laminados

Los laminados tienen mayor densidad que todos los aglomerados y conglomerados y que algunas maderas, gran resistencia a las adversidades meteorológicas, gran dureza y una casi ausencia de coloración y disminución de las vibraciones.

Esto es debido a que está laminado y cada una de sus capas está en una dirección disminuyendo vibraciones y aportando rigidez. En aquellas frecuencias que presenta algo de coloración se puede disminuir con materiales absorbentes. Su precio es mayor al de todos los conglomerados y aglomerados pero mucho menor que las maderas macizas de su misma densidad y dureza.

Una vez analizados todos los tipos de maderas, teniendo en cuenta su precio y su densidad, que a pesar de ser una característica positiva, es mucho más pesado de transportar en pro de una mejor calidad de sonido finalmente nos hemos decantado por el laminado. Por otra parte, las cajas de gama alta suelen estar hechas de madera maciza o laminada, por lo que en principio es una buena elección.

En concreto se ha utilizado **abedul fenólico laminado de 18mm**. Aunque es cierto que para cajas de graves y subgraves a veces se utilizan espesores mayores. El

hecho de utilizar un único grosor ha sido debido a su **simplicidad** al hacer el despiece de los planos y encargar las piezas, a su **portabilidad** ya que al añadir piezas de un grosor mayor el peso final aumenta considerablemente, y a su **coste**, incluir piezas de distinto grosor implica tener que adquirir un tablón solo para ese número reducido de piezas.

Pegamento

El uso de un buen pegamento es clave a la hora de que todas las piezas de la caja queden perfectamente unidas y selladas. Es necesario que el tipo de pegamento utilizado sea resistente a la humedad y tenga un tiempo de secado medio. Utilizar cola de contacto nos creará problemas a la hora de ensamblar las piezas si no acertamos a la primera, por ello la cola utilizada debe tardar al menos unos minutos en quedarse rígida para que nos de tiempo acomodar la o las piezas que estamos pegando e incrustar los tirafondos antes de que se seque. A la hora de aplicar cola hemos de ser generosos, es fundamental para un buen pegado que al unir las piezas el pegamento salga por los bordes, síntoma de que toda la superficie que queremos pegar ha quedado en contacto con ella.

Una vez unidas las piezas una fina capa de silicona en las uniones ayudará a preservarlas de la humedad y de que la cola termine agrietándose y secándose si en un futuro se expone a altas temperaturas.

Tirafondos

Una vez unidas las piezas con pegamento y antes de que este se seque es de vital importancia incorporar los tirafondos, este elemento es el que verdaderamente da rigidez a la unión.

Perforando con una broca del mismo grosor que el tirafondo una de las partes que queremos unir y dejando sin perforar la siguiente conseguimos que el tirafondo tire de esta segunda pieza hacia la primera dejando ambas fuertemente unidas.

Cinchas y gatos

A la hora de presentar las tablas antes de ser pegadas e incluso una vez dispuesto el pegamento, es necesario ayudarnos de cinchas y gatos para hacernos una idea de cómo va a quedar todo dispuesto. A la hora de unir dos caras de nuestra caja ayudarnos de gatos hará que estas queden firmemente unidas, no obstante no será hasta que clavemos los tirafondos cuando estos hagan la máxima fuerza y la piezas queden de verdad unidas.

Pasta de madera

Es posible que durante el proceso de construcción se nos rompan pequeñas partes de las piezas de madera, o las piezas no queden correctamente unidas pudiendo según que partes afectar al rendimiento acústico de la caja. Para ello confeccionaremos esta pasta de cola a partir de serrín muy fino de la misma madera que estemos utilizando mezclada con cola, la consistencia de esta pasta una vez seca es incluso más fuerte que la propia madera. Es importante que el serrín sea de la misma madera.

2.2. Montaje

2.2.1. Pasos

En este apartado vamos exponer los pasos que se han seguido para la construcción de la caja, partiendo de un tablón de madera hasta el acabado final de nuestra caja. Es importante seguir el orden de estos pasos pues de otra forma nos llevaría más tiempo del necesario y nos llevaría a cometer errores que más adelante nos serán imposibles de corregir, como el orden de pegado de las piezas. A continuación se detallan por orden cronológico los pasos a seguir.

La madera se obtiene normalmente a partir de la compra de tabloncillos de una medida estándar de 2500x1250mm. Una vez diseñado y obtenido el plano se debe hacer el despiece de las partes de la caja, identificando cada pieza por separado optimizando el tamaño del tablero para utilizar el menor número de ellos posibles. Si

no se dispone de la maquinaria adecuada, puede ser conveniente mandar cortar las piezas más grandes para facilitarnos el transporte.

Una vez cortadas todas las piezas, debemos ‘presentar’ la caja mediante gatos y cinchas para saber en qué parte va cada una. Para ello tomaremos una de las piezas exteriores (superior, inferior o lateral) donde dibujaremos con precisión las superficies de contacto de unas piezas con otras, para asegurarse y no tener que estar marcando las piezas más adelante, se puede realizar este procedimiento en cada una de las piezas exteriores.



Figura 4. Presentación de la caja antes de pegar las piezas

Tomando una de las piezas exteriores ‘maestras’ como referencia comenzamos a agujerear donde deberán estar marcadas las superficies de unión entre unas piezas y otras. El diámetro de los agujeros debe ser el mismo que los tirafondos para que al introducirlos tiren de la otra pieza hacia esta. Cuando se trata de un altavoz de graves no se debe escatimar con los tirafondos, introduciremos tirafondos cada 5cm en las zonas donde se prevea mayor vibración y cada 10cm en el resto. Es conveniente avellanar cada agujero para que la cabeza del tirafondo al

atornillar entre más adentro y en un futuro podamos cubrir la superficie exterior con masilla dejando las cabezas de los tirafondos cubiertas.

Una vez dibujado donde va cada pieza, comenzaremos por aquellas piezas más delicadas, es decir aquellas de las que más va a depender el sonido, el ángulo de la pieza donde incrustaremos el cono, la cámara del altavoz, las piezas que forman los ángulos de las bocinas etc... Empezando por estas partes vamos trasladando los posibles errores que surjan a partes donde van a ser menos notorios acústicamente. Haciendo que el resto de tablas y componentes se adapten a estas piezas.



Figura 5. Pegado de la primera pieza de la caja de medios

Es importante que al ir pegando las piezas contemos con que deberemos insertar en los laterales las dos asas para transportar la caja una vez construida, así como contar con que en la parte trasera deberemos colocar los conectores. Cubrimos con pasta de madera las partes donde nos hayan quedado huecos.

2.2.1. Unión de piezas

Más importante que la madera que se utilice para la construcción, es la forma en que las piezas quedan unidas, debe hacerse de una forma firme y que perdure en el tiempo, las cajas de graves y en general aquellas que soportan una gran presión acústica están sometidas a fuertes vibraciones que pueden hacer que aunque a primera vista las partes parezcan bien unidas comiencen a vibrar entre ellas.

Mordido de maderas.

La mejor forma de conseguir uniones rígidas consiste en rebanar mediante una fresadora la zona donde irá incrustada la otra pieza de forma que al colocarlas estas encajen en las hendiduras y así no se tenga problemas a la hora del pegado evitando que estas se muevan. Las piezas de madera quedan 'mordidas' unas con otras proporcionando la mayor fijación posible.

Lo malo de este método es el largo tiempo que lleva, preparar un molde para rebanar las piezas de madera hace que únicamente se convierta en algo efectivo cuando vamos a realizar una tirada larga de unidades.

Independientemente de utilizar este método todas las piezas deben ir pegadas y atornilladas.

Panel de sujeción del altavoz

Es una de las piezas más importantes y una a la que más atención hay que prestar sobre todo si se trata de una caja para graves. Para que el altavoz encaje perfectamente en la pieza el agujero debe ser lo más exacto posible. Para ello utilizaremos una fresadora con un sistema parecido al que observamos en la Figura 3. Es conveniente que el altavoz no vaya atornillado directamente en la madera, debido a que las vibraciones darían de sí la madera. Para ello utilizamos un sistema de roscado sobre metal, y no sobre madera. Estos se incrustan en la superficie de madera mediante unas pestañas, dándonos más sujeción y permitiendo que los tornillos entren y salgan las veces que queramos sin dar de sí el material. La pieza debe quedar colocada en la superficie contraria donde irá el altavoz, de forma que al atornillar la propia pieza tire hacia la madera.

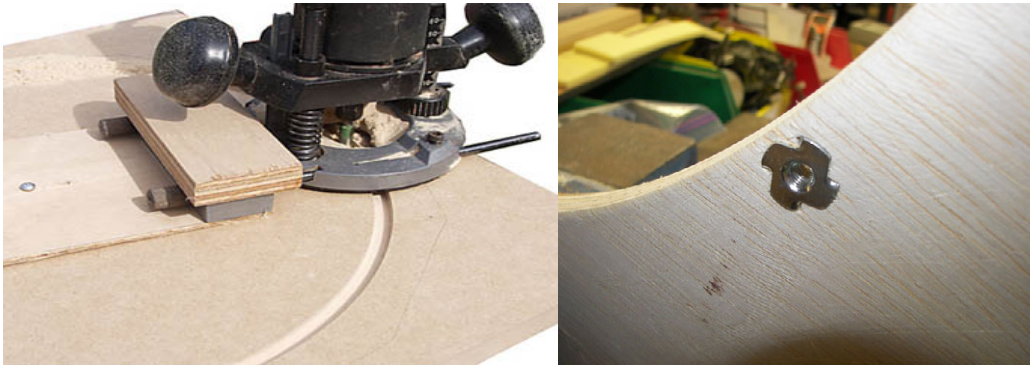


Figura 6. (a) Fresadora (b) pestaña para atornillar el altavoz

2.2.2. Refuerzos anti vibración

En la caja de un altavoz de graves aún con las uniones verdaderamente rígidas pueden seguir apareciendo vibraciones en aquellas piezas que tengan superficies grandes sin ningún punto de anclaje. A partir de aquí surge la pregunta: ¿a partir de cuántos cm^2 se considera que una superficie será vibrante? Todo depende de la frecuencia a la que esté trabajando la caja, del espesor de la pieza y la localización de dicha pieza dentro del conjunto.

A menores frecuencias, menos serán los cm^2 que podemos dejar sin reforzar. Un mayor espesor y masa de la pieza nos permiten no tener que ser tan meticulosos en este aspecto, y hacen que el número de refuerzos a incluir sea menor. Por otra parte si la pieza está en contacto directo con la pieza que sujeta el cono, debe ser reforzada en la mayor medida posible.

Para evitar esto no se debe escatimar en poner refuerzos que vayan reduciendo las superficies vibrantes ya que además añaden masa al conjunto.

3 Caja de graves

3.1. Caja de graves. Cubo 18

Cubo es un diseño de caja multifunción principalmente diseñado para graves y sub-graves. Está diseñado para trabajar por solitario o en compañía de otros cubos.

Es un diseño económicamente efectivo, pequeño y verdaderamente ligero comparado con el resto de graves y subs. El primer prototipo de este modelo fue construido en 2007 [4], CUBE 18 es el 5º prototipo de todos estos cubos.

Dentro de este modelo de caja existen otros diseñados para albergar drivers de 12, 15, 18 y 21 . Además de su versión 218 basada en la misma tecnología pero con capacidad de albergar dos driver de 18 pulgadas dentro de la misma caja. La elección de este modelo de Sub, se ha hecho en base a las necesidades y expectativas que la mayor parte del colectivo esperaba.

Como colectivo teníamos claro que nuestro modelo debía ser ligero, para poder transportarlo con facilidad. Por otra parte antepusimos perder unos cuantos Hz a costa de obtener una mejor respuesta a transitorios. También desechamos las cajas paso banda por un tema de eficiencia, queríamos aprovechar al máximo el rango de actuación de nuestro altavoz.

Cubo 18 es un modelo híbrido que combina la tecnología Taped Horn con la radiación directa de nuestro driver. Dentro de los diferentes modelos de este altavoz, encontramos modelos centrados en reproducir las frecuencias más bajas posibles, como el *Cubo Sub* [4] y otros más centrados en obtener una mejor respuesta a costa de perder unos cuantos Hz como es el caso de nuestro *Cubo*. Como híbrido entre estos dos modelos se encuentra el *Cubo Extended*.

Todo esto se produce entre otras cosas en función de la acción que produce la caja sobre la “rigidez del cono” (variación de Fb). Básicamente las principales diferencias entre todos estos son el volumen interior y la disposición del *Horn Panel*, que es el panel unido a la pieza que sujeta al altavoz y que dirige el *laberinto de la onda acústica*.

Cubo 18 vs Cubo Extended

Estos dos cubos son modelos muy similares, las dimensiones externas son exactamente las mismas, lo única modificación consiste en la longitud del laberinto acústico que recorre la onda interior creada por la parte trasera del diafragma.

Cuanto mayor es el recorrido acústico más baja es la F_b de la caja, el laberinto se suele diseñar $Y/4$ de la frecuencia a la que se quiere sintonizar la caja.

Por el contrario cuanto mayor es el laberinto acústico antes de que la onda salga, mayor es el retardo que esta produce y por lo tanto peor su respuesta a transitorios [5].

Elección del cono

La elección del cono para la caja se hizo en base a una serie de especificaciones del diseñador de la caja [4].

Uno de los parámetros a tener en cuenta ha sido el Efficiency Bandwidth Product (EBP), que es la relación entre la frecuencia de resonancia del altavoz F_s y el factor de sobrecarga eléctrico (Q_{es}) que representa numéricamente la cuantía de las pérdidas eléctricas. Se especifica que un $EBP > 100$ es óptimo para cajas con aperturas (bocinas plegadas o bass réflex) un $EBP < 50$ indica que es óptimo cuando se monta en una caja sellada y cuando $100 > EBP > 50$ es válido para ambas cajas. Todo esto solo se puede tener en cuenta de manera aproximada. De las especificaciones de nuestro cono obtenemos: $F_s = 30\text{Hz}$, $Q_{es} = 0,29$ obteniendo así un $EBP = 104$. Así de manera aproximada podemos decir que nuestro cono funcionará de manera óptima en este tipo caja.

Se especifica[4] que la F_s de nuestro altavoz debe estar entre (22-42 Hz), según la hoja de especificaciones nuestro altavoz tiene una $F_s = 30\text{Hz}$.

El factor de perdidas totales del altavoz Q_{ts} es decir tanto las perdidas eléctricas como mecánicas debe estar entre (0.25 - 0.58), según las hojas de especificaciones nuestro altavoz tiene un $Q_{ts} = 0,29$.

El volumen acústico equivalente a la suspensión del altavoz V_{as} que es el volumen que debería tener una cavidad llena de aire para que tuviese una elasticidad equivalente a la del altavoz. Se especifica debe estar entre (200 - 450 L), según las hojas de nuestro altavoz llega hasta los 411L.

Según el diseñador de la caja [4], por lo tanto nuestro altavoz cumple con los requisitos aproximados para que este tenga un buen funcionamiento. No es recomendable de todas formas dar mucha importancia alguno de los parámetros en particular ya que el buen comportamiento del cono dentro de una caja depende del conjunto de todos ellos.

3.2. Respuesta en frecuencia

Además de utilizar respuesta en frecuencia de nuestra caja para ver de una forma exacta cómo se comporta utilizaremos la respuesta en frecuencia para dar solución a varias incógnitas como la necesidad de material absorbente en nuestra caja, la importancia de la colocación de nuestro cono y como se comporta verdaderamente la *bocina / bass-réflex* de nuestra caja.

Material absorbente

El uso de material absorbente dentro de las cajas se utiliza para atenuar las resonancias y modos propios que pueden aparecer dentro de la caja a partir de unos 200Hz.

El uso de material absorbente por lo tanto en cajas de graves y sub-graves no tiene tanta importancia como en el resto, de hecho no llega a tener una relevancia notoria hasta pasados los 100Hz como puedo observarse en la figura 7.

Aunque idealmente el filtro de nuestro altavoz debería cortar en torno a unos 125Hz, si mandamos una señal sinusoidal de unos 60Hz su segundo armónico estará en 120Hz el tercero en 240Hz... Esto implica que aunque utilicemos un filtro a una cierta frecuencia no nos asegura que nuestro altavoz únicamente vaya a actuar en ese rango específico. Por lo que de primeras si podría tener sentido el uso de material absorbente en este tipo de cajas.

Por otro lado las resonancias dentro de la caja varían mucho en función del diseño de esta, cajas con forma cúbica suelen ser las más afectadas por este fenómeno [4], y la superficie posterior al cono donde más resonancias suelen aparecer.

Aunque nuestra caja exteriormente tenga forma de cubo, la disposición del altavoz con un cierto ángulo reduce este fenómeno, así la onda posterior del cono no rebota de forma violenta produciendo resonancias minimizando este problema.

Una vez construida la caja surgieron dudas sobre si este material absorbente afectaría al rendimiento de la bocina / Bass réflex. Lo cierto es que en principio la caja,

está diseñada para actuar en frecuencias por debajo de los 200 Hz que es donde comienza actuar el material absorbente así que la eficiencia de esta queda intacta.

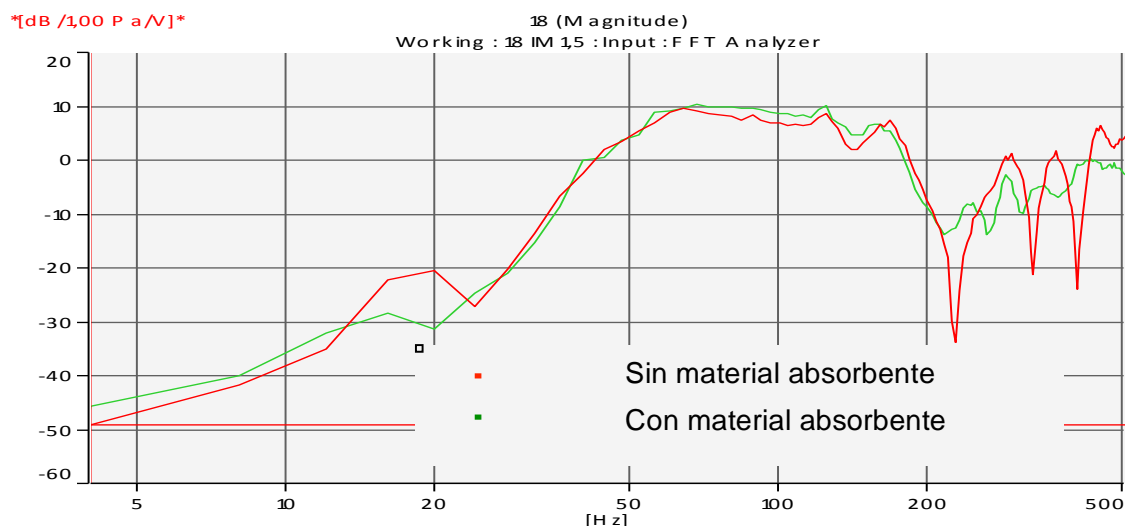


Figura 7. (Rojo) respuesta en frecuencia de la caja sin absorbente
(Verde) respuesta en frecuencia de la caja con absorbente.

Se observa como en torno a los 235 Hz aparece una fuerte cancelación debido a resonancias y modos dentro de la caja. Más claramente se ve como con material absorbente se reducen notablemente las cancelaciones, aunque sin desaparecer del todo.

Pese a esto se ha decidido no rellenar la cámara de material, pues en ninguna ocasión se tiene previsto que nuestro altavoz trabaje en torno a los 250Hz. Una cámara sin material hace que la temperatura dentro disminuya debido a una mayor ventilación y por lo tanto no llegue a calentarse tanto nuestro cono si se mantiene durante mucho tiempo funcionando.

Como se explica en este mismo apartado aunque no se manden señales en torno a los 250Hz pueden aparecer debido a armónicos de frecuencias más bajas, el nivel de estos es despreciable frente al resto por lo que no es razón para incluir material absorbente.

Posición del altavoz

Desde la perspectiva del funcionamiento de un Bass réflex, el imán dentro de la caja significa una reducción del volumen interior, lo que significa que la frecuencia de trabajo de este aumentará [4]. El tamaño de la superficie de la bocina es más grande y por lo tanto también la frecuencia a la que quede sintonizada también será más alta.

Desde la perspectiva de funcionamiento de la bocina, el imán por fuera reduce el tamaño de la bocina, y su efectividad. El volumen de la cámara aumenta lo que aporta una mayor facilidad para la reproducción de bajas frecuencias.

El imán dentro de la cámara aumenta el volumen de la bocina y disminuye el volumen de la cámara y por lo tanto las facilidades para reproducción de bajas frecuencias.

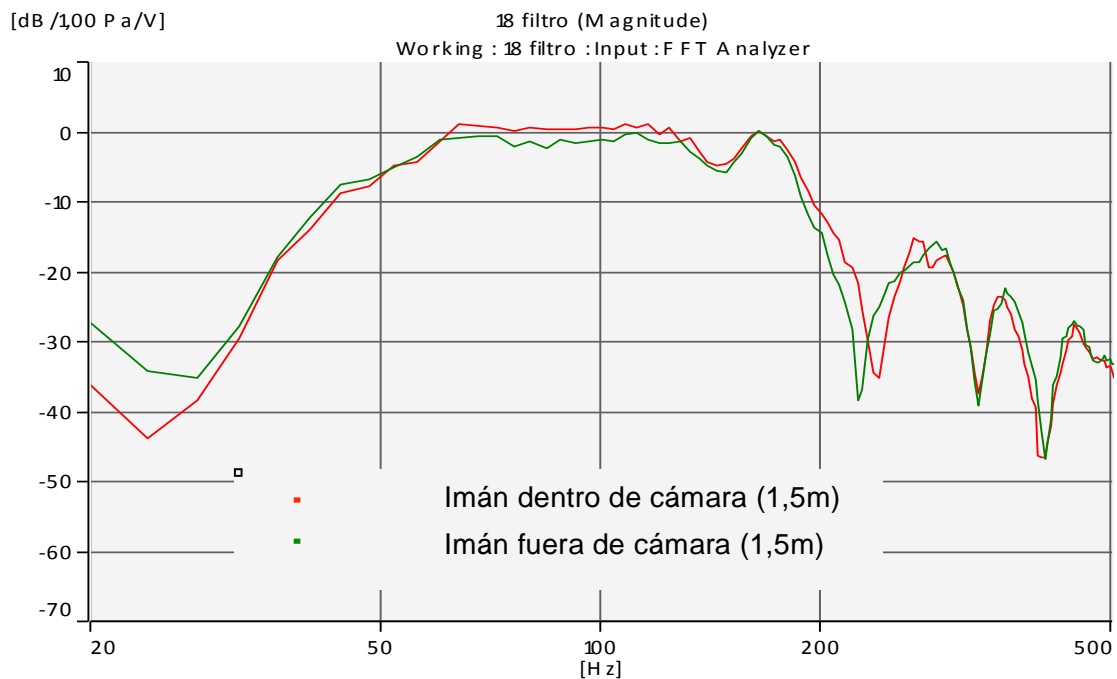


Figura 8. (Rojo) respuesta en frecuencia de la caja con el imán dentro de la cámara (Verde) respuesta en frecuencia de la caja con el imán fuera de la cámara.

Aunque como se explica en este apartado la colocación del imán debería influir en el sonido final solo es así desde un punto de vista teórico ya que en la práctica este efecto es despreciable, no se aprecia en las gráficas de una forma notable la reproducción de frecuencias mas bajas y mucho menos de oído.

En la figura 8 se observa como con el imán dentro de la cámara la primera cancelación se desplaza unos pocos Hz, algo despreciable teniendo en cuenta también el punto de corte de nuestro sistema.

Finalmente se optó por mantener el imán dentro ya que la respuesta en frecuencia es prácticamente la misma y además esta parte es más sensible a la suciedad y por motivos de mantenimiento es más seguro tenerla dentro.

Medida de la frecuencia a la que actúa la bocina.

Una de las mayores complicaciones al medir este tipo de sistemas es separar los dos puntos radiantes debido a que la longitud de onda a la que actúan es mucho mayor que la distancia entre ambos radiadores. Por una parte la radiación directa de nuestro altavoz y por otra la radiación de nuestra bocina/Bass réflex. Aunque acerquemos lo suficiente el micrófono a alguna de estas superficies es difícil descartar la otra. Además al no poseer una cámara anecoica que funcione a tan bajas frecuencias también nos es complicado captar la respuesta en conjunto de la caja. Si alejamos demasiado el micrófono captaremos además de la radiación directa de la caja las distintas reflexiones producidas en la cámara. Si acercamos el micrófono cerca de la caja para evitar reflexiones es probable que en vez de captar la respuesta conjunta de la caja lo estemos haciendo en mayor medida de la radiación directa o de la bocina Bass réflex.

Para medir la radiación directa se ha procedido a rellenar de forma completa el interior de la caja así como la superficie radiante de la bocina de esta forma se minimiza la radiación de esta parte de la caja.

Para obtener la respuesta de la bocina/Bass réflex se ha introducido el micrófono justo en la garganta de ésta intentando desechar la mayor parte de la radiación directa. Aunque es probable que esta medida no sea debida estrictamente a la radiación de la bocina se aprecia con cierta claridad en la figura 9 aquellas frecuencias en las que está actuando .



Figura 9. (Roja) Caja completa, (Verde) Solo bocina , (Negra) Bocina tapada.

Para intentar captar solo la señal debida de la bocina introducimos el micrófono en la garganta de esta a la vez que se tapaba en la medida de lo posible el cono con material absorbente, para intentar minimizar su radiación, figura 9 gráfica verde. Aunque es difícil separar ambas radiaciones se puede apreciar de forma clara como las frecuencias a las que verdaderamente queda sintonizado ronda los 50Hz y 55Hz como se puede ver en la figura 9 gráfica verde. Según la respuesta en frecuencia podemos observar que la radiación no tiene una respuesta plana si no que se centra en frecuencias determinadas en este caso 50Hz y 180Hz es donde alcanza su máximo nivel.

En la figura 10 podemos observar la gráfica de la impedancia eléctrica de entrada [11] de nuestro altavoz una vez montado dentro de nuestra caja de graves. Su forma como se explica en el apartado 1.2 es muy parecida a la de un bass réflex a diferencia del tercer pico que aparece situado entre los 150Hz y 200Hz que por otra parte como se aprecia en la respuesta en frecuencia parece ser despreciable.

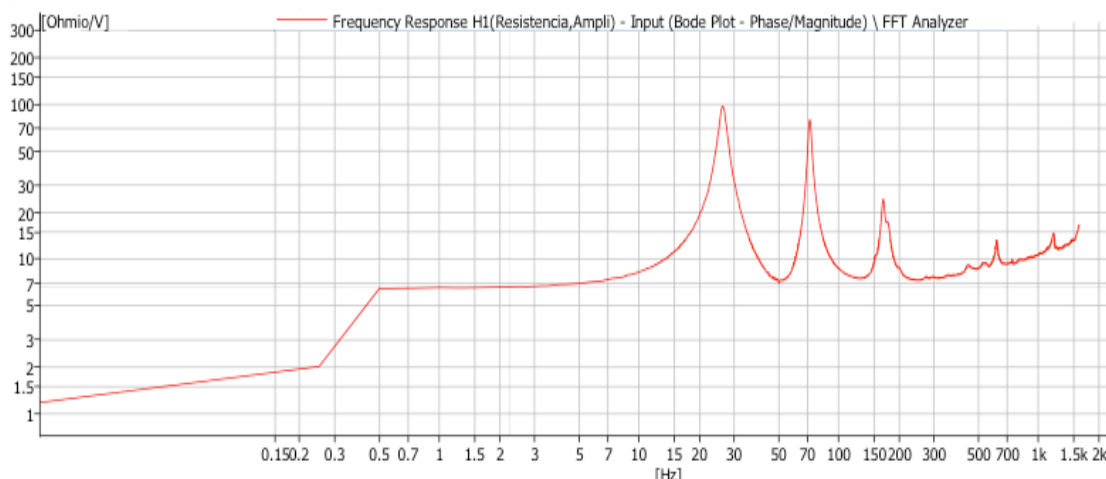


Figura 10. Impedancia eléctrica de entrada del altavoz cargado en la caja cubo 18.

Entre el modelo cube 18 y sus variaciones, como se explica en este mismo capítulo, tienen como diferencia fundamental la longitud de la bocina plegada y el volumen de la caja. Viendo la respuesta del Cube 18, y sabiendo que es el modelo con la longitud de bocina más corta podemos llegar a la conclusión de que este es el modelo funciona como un bass réflex. A medida que el volumen de la caja y la longitud de la bocina plegada son mayores más se aleja del bass réflex y su funcionamiento se asemeja más al de una bocina como se ha confirmado al medir la impedancia eléctrica de entrada.

No obstante aunque el funcionamiento se asemeje más a un bass réflex aparecen “rizados” y cancelaciones pasados los 200Hz como los que suelen aparecer debido al efecto de bocinas.

La respuesta de la caja con la bocina tapada por completo (*figura 10*), nos da una respuesta mucho más plana. No incrementa para nada su funcionamiento en torno a los 50Hz - 55Hz pero si lo hace en torno a los 180Hz como lo hacía la bocina.

Por lo tanto el aumento del modulo en la respuesta en frecuencia en torno a los 180Hz es debido a la actuación del altavoz y no de la caja pues está presente en ambas medidas.

Fijándonos en el funcionamiento normal de la caja (*figura 10*) (radiación directa + bocina), podemos ver como ganamos nivel a baja frecuencia y como al tener los dos

radiadores funcionando aparecen gran número de cancelaciones pasados los 200Hz, cuestión que por otra parte nos es indiferente pues se encuentran fuera del rango de actuación.

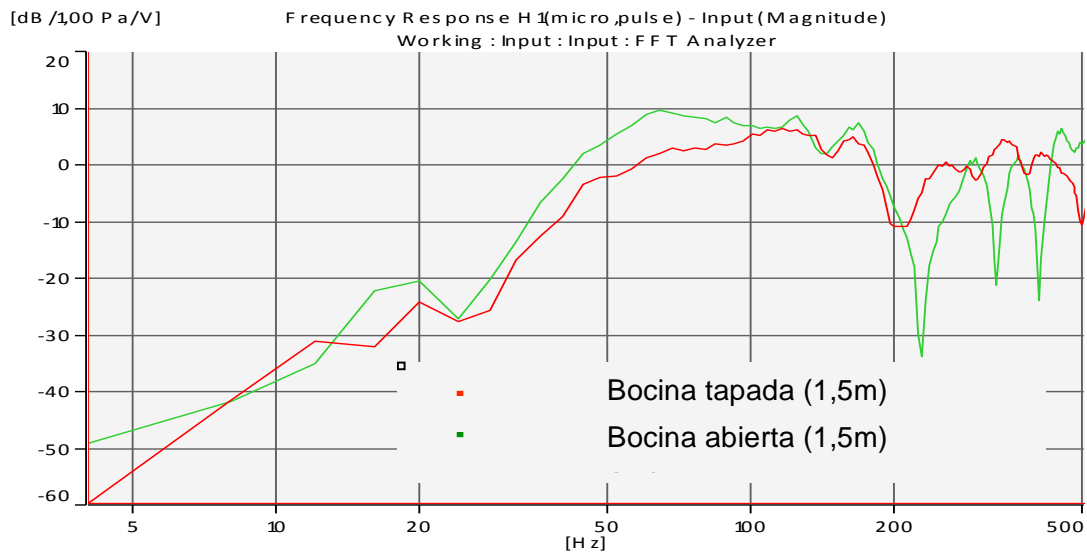


Figura 11. (Rojo) Funcionamiento sin bocina (Verde) funcionamiento con bocina

De esta forma en condiciones normales de medida (separado 1,5m y a 1m de altura) queda mucho más claro el verdadero efecto de la bocina, se ve en la figura 11 como la respuesta gana entre unos 7-8dB en torno a los 50-55Hz con respecto a la radiación directa del cono.

4 Caja de medios agudos

EL MT130 es un modelo que viene como evolución del MT121, inventado por Marc [3], un ingeniero de sonido francés. Este modelo ha sido desarrollado para obtener una respuesta en frecuencia más plana que sus anteriores modelos además de una construcción más sencilla y económica. A pesar de que el MT130 lleva más de 4 años construyéndose todavía existe una gran mayoría de modelos MT121 frente al MT130, la mayoría de los constructores de cajas construyen un modelo u otro pero no los dos, por lo que nos es difícil obtener comparaciones fiables entre ambos. A partir del MT121, también surgió el MT 102 que incorpora a la bocina de medios un altavoz más. Toda esta gamma de cajas están pensadas para colocarse en lo alto de sistemas de PA.

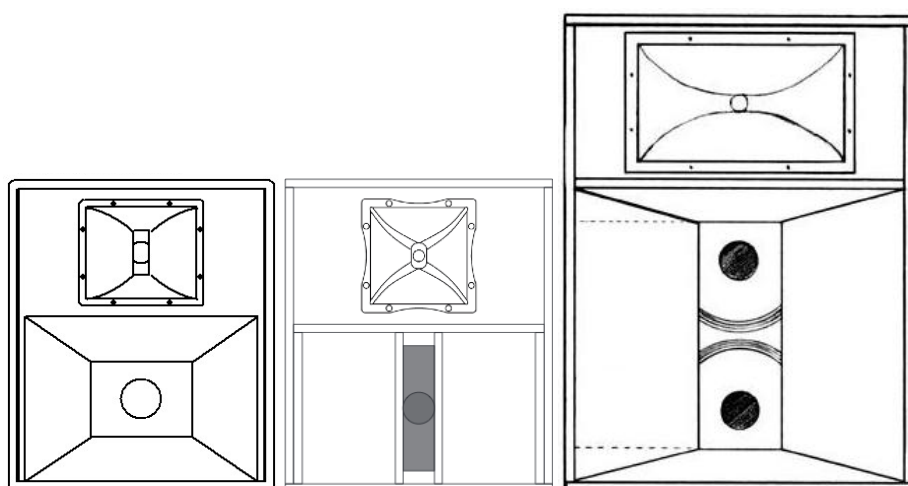


Figura 12. Modelos MT: de izquierda a derecha Mt121, Mt130, Mt102

Se ha elegido este modelo debido a su capacidad de radiar a largas distancias [4].

Este modelo está dividido en dos partes, la parte superior encargada de los agudos con un motor de 1" y la parte inferior, un sistema abocinado encargado de los medios. Esta parte consta de una cámara con un volumen lo más reducido posible, y una apertura rectangular en la parte frontal que actúa como cámara de compresión previa a la bocina. Se baraja en un futuro si se decide ampliar el sistema, cortar la caja del MT-130 justo donde termina la parte de medios y poder utilizar ambas por separado.

4.1.1. Elección del cono y del motor

La parte de medios del MT-130 ha sido diseñado para uno cono en particular, “*Precision Devices 121[4]*”. Este altavoz a su vez ha sido diseñado para este tipo de sistemas abocinados, por ello al no entrar en el tema de diseño de la caja lo más conveniente ha sido utilizar el mismo modelo de altavoz. Si hubiésemos optado por otro modelo el diseño de la caja y la bocina hubiesen tenido que ser adaptados a los parámetros de este nuevo modelo y por lo tanto se hubiese tenido que rediseñar por completo el Mt-130. En cuanto a la parte de agudos el modelo original especificaba el uso de un motor BMS 4550 y una bocina HF64. No obstante el sistema de agudos del MT-130 es independiente del modelo de la caja, pues a estas frecuencias la importancia de esta es nula. Simplemente va empotrado en la parte superior. Por ello elegimos un motor de 1” Beyma CD10FE y una bocina beyma TD-164 . Este modelo es algo más barato que el modelo incluido en el diseño original y mucho más fácil de conseguir membranas de repuesto en caso de rotura.

4.1.2. Protección de Agudos

La bocina de agudos en todos los sistemas siempre es la parte más sensible de todas, y también la de mayor eficiencia, siendo el ratio Watios/dB mayor con respecto a las otras vías.

En cuanto a la eficiencia, es muy habitual que a la hora de construir cajas donde se incorporan este tipo de motores de compresión junto con conos de radiación a frecuencias más bajas, si no se toman medidas puedan quedar enmascarados por los agudos.

En cuanto a la sensibilidad, los motores de agudos no tienen el mismo funcionamiento que los conos, funcionan a través de una membrana mucho más sensible por lo que debemos tener mucho más cuidado con la señal que se les envía.

Una señal que se exceda en potencia enviada a un cono puede hacer que con el tiempo pueda llegar a quemarse su bobina, en un motor de agudos este tiempo es mucho menor, una señal con más watios de lo establecido puede terminar con la membrana y su bobina prácticamente en el momento.

Lo mismo ocurre con el rango de frecuencias, un cono de graves o medios es capaz de reproducir frecuencias fuera su rango de funcionamiento sin mayor problema

que producir una distorsión. Sin embargo en el caso de los motores de agudos una señal mal filtrada con componentes a baja frecuencia puede hacer que la excursión de la membrana sea excesiva y terminar con su funcionamiento prácticamente también en el momento.

Por ello además de tener un cuidado mucho mayor con esta parte del equipo es conveniente tomar una serie de medidas que nos garanticen que aunque la señal enviada exceda en potencia y en bajas frecuencias lo soportado por el motor no termine por quemarla.

Para ello se presentan tres soluciones:

Incorporación de una bombilla que funcione como fusible entre la etapa y el motor, de modo que cuando excedamos la potencia permitida la bombilla disipe el exceso de potencia, hasta un cierto punto. Una vez superado el umbral de la bombilla esta se fundirá actuando como circuito abierto y cerrando el paso de corriente al motor. Esta parte del equipo dejará de sonar pero la habremos protegido de una posible rotura, basta con cambiar la bombilla por otra para que vuelva a funcionar.

Esta bombilla puede dejarse ver desde fuera de la caja para avisarnos cuando la potencia está sobrepasando el umbral y corregir a tiempo el problema.

El inconveniente de todo esto es que el hecho de conectar una bombilla ya está disipando potencia y eficiencia del motor se ve reducida.

La solución cuando hemos construido una caja donde los agudos “suenan demasiado” pueden llegar a enmascarar parte de la señal de medios es incluir una resistencia bobinada, que simplemente actuará como reguladora de la potencia entregada al motor de agudos. Esto es efectivo sobre todo si no tenemos un procesador / crossover que controle el nivel de señal que llega a cada vía.

Para evitar llegue una señal con contenido en baja frecuencia y nuestra membrana excursione en exceso rompiéndose, es añadirle además de todo el filtrado activo un filtro pasivo paso alto en la propia caja que nos asegure que pase lo que pase ese motor no reproducirá más debajo de determinada frecuencia.

El inconveniente de esto son los problemas de fase que pude acarrear meter un filtro más en el camino de la señal.

4.2. Caracterización de Medios

En este apartado se presentan los resultados de directividad y respuesta en frecuencia para nuestra caja de medios agudos, dándonos una idea más concreta de cómo actúa este tipo de caja.

Respuesta en frecuencia

Para caracterizar nuestra caja de medios hemos medido su radiación en “campo lejano” (2m), en la boca de la bocina y en su garganta. En la figura 13 vemos como a partir de 1K la respuesta comienza a oscilar produciendo un efecto “peine” debido a los modos que se producen dentro de la bocina. Comparando la respuesta medida en la boca (rojo) y en la garganta (negro) observamos como la magnitud de las cancelaciones es mucho mayor según nos adentramos en la bocina, y como esta tiende a estabilizarse según nos alejamos (verde). Aun así el rizado en la respuesta es demasiado pronunciado, por ello se ha optado por eliminar esta parte de la respuesta en frecuencia del sistema final. Por otra parte vemos como en “campo lejano” la respuesta entre los 200Hz y 1K es mucho más plana que la obtenida justo en la boca de la bocina. Es un indicador más de lo que afirma Marc[3], sobre que el diseño de esta caja está pensado para radiar a largas distancias.

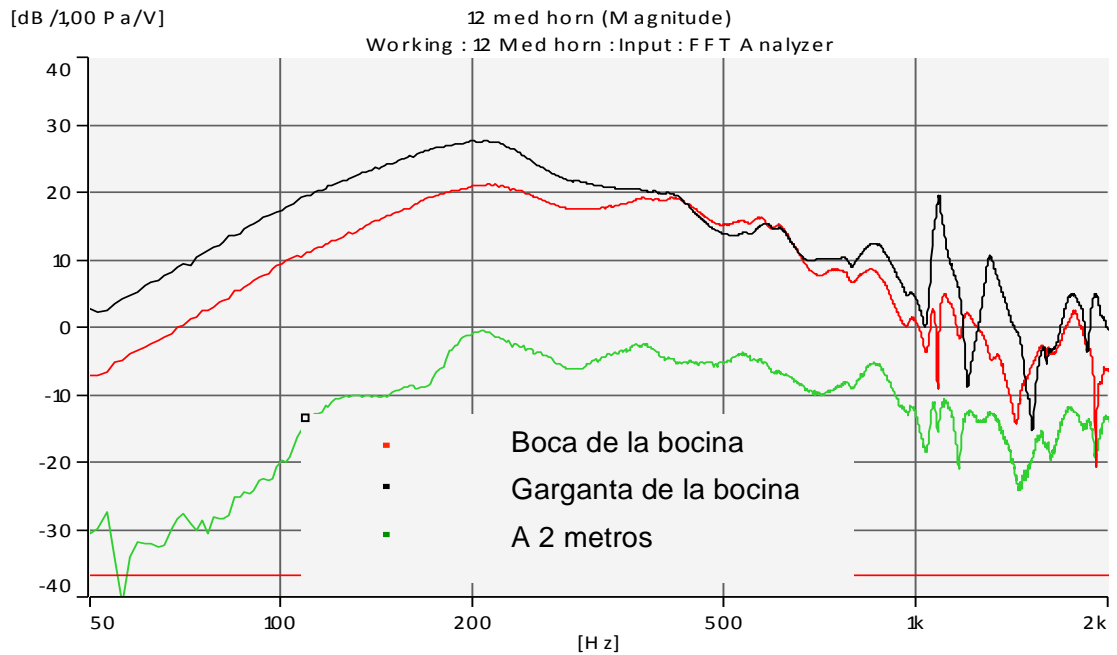


Figura 13. (Rojo) Medida realizada en la boca de la bocina de medios, (Verde) Medida realizada a 2m de la caja, (Negro) Medida realizada en la garganta de la bocina

Directividad

La directividad nos muestra la relación del nivel radiado por nuestra caja en el eje respecto a la radiada en los diferentes ángulos de giro.

Para medir la directividad de nuestro MT-130 hemos utilizado la mesa giratoria LT-360 , configurada con nuestro software de medida a través de una señal de trigger que los sincroniza.



Figura 14. Precision Turntable LT 360.

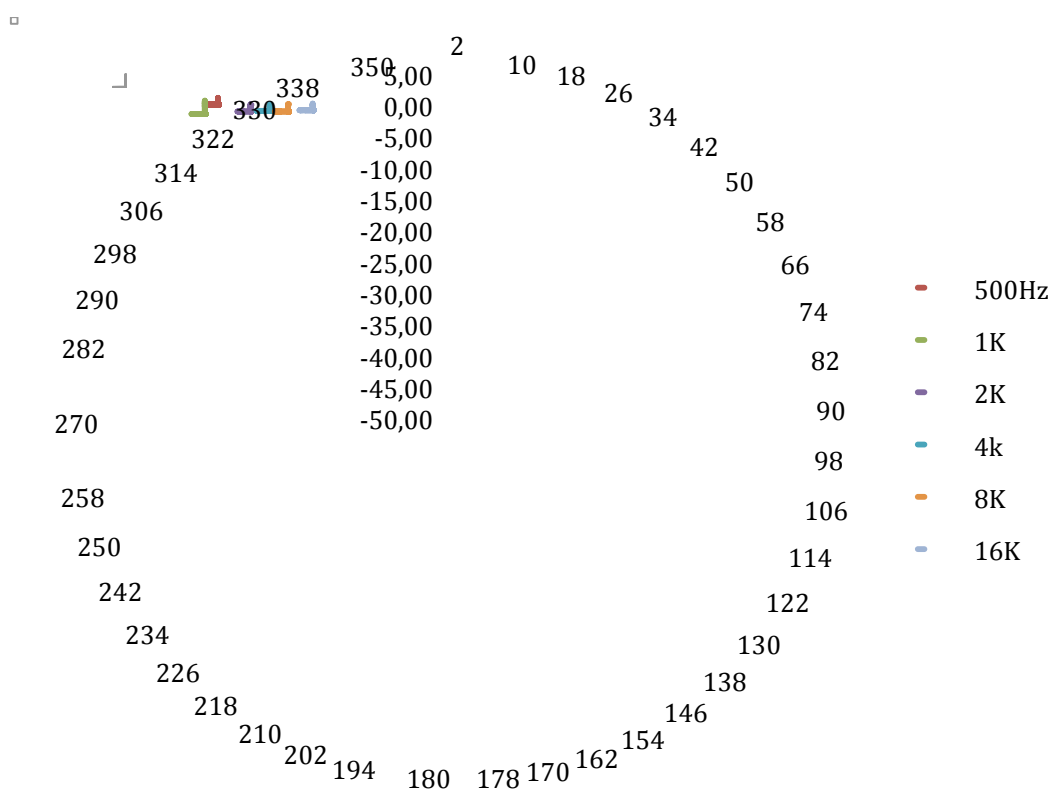


Figura 15. Gráfica donde se muestra la directividad del MT-130 para 500Hz, 1K, 2K, 3K, 4K, 8K, 16K.

Según se observa en la figura 15, a partir de las frecuencias de corte elegidas [5.1.2], la directividad medida a 500Hz es radiada por el cono de medios mientras que el resto de frecuencias las radia nuestro motor de agudos. Cabe destacar el hecho de que la medición hecha a 500Hz tiene una directividad mayor que a 1K. Esto puede ser debido a que aunque la frecuencia sea más baja y la directividad debiera ser por lo tanto más baja al utilizar un cono de mayor tamaño la directividad aumenta.

5 Sistema Completo

En este capítulo se estudia el sistema completo, y se exponen los pasos a seguir para la optimización de un sistema de sonido de 3 vías.

El principal objetivo a la hora de poner a punto nuestro sistema es conseguir una respuesta en frecuencia lo más plana posible. Para ello primero equilibraremos la potencia suministrada al sistema a través de los amplificadores, después elegiremos el tipo de filtro y frecuencias de corte del sistema y por último alinearemos la fase de cada vía para evitar las diferencias de fase en los puntos de cruce.

En la figura 16 se muestra una foto de nuestro sistema completo, la separación entre ambas cajas simula la posición final de colocación.

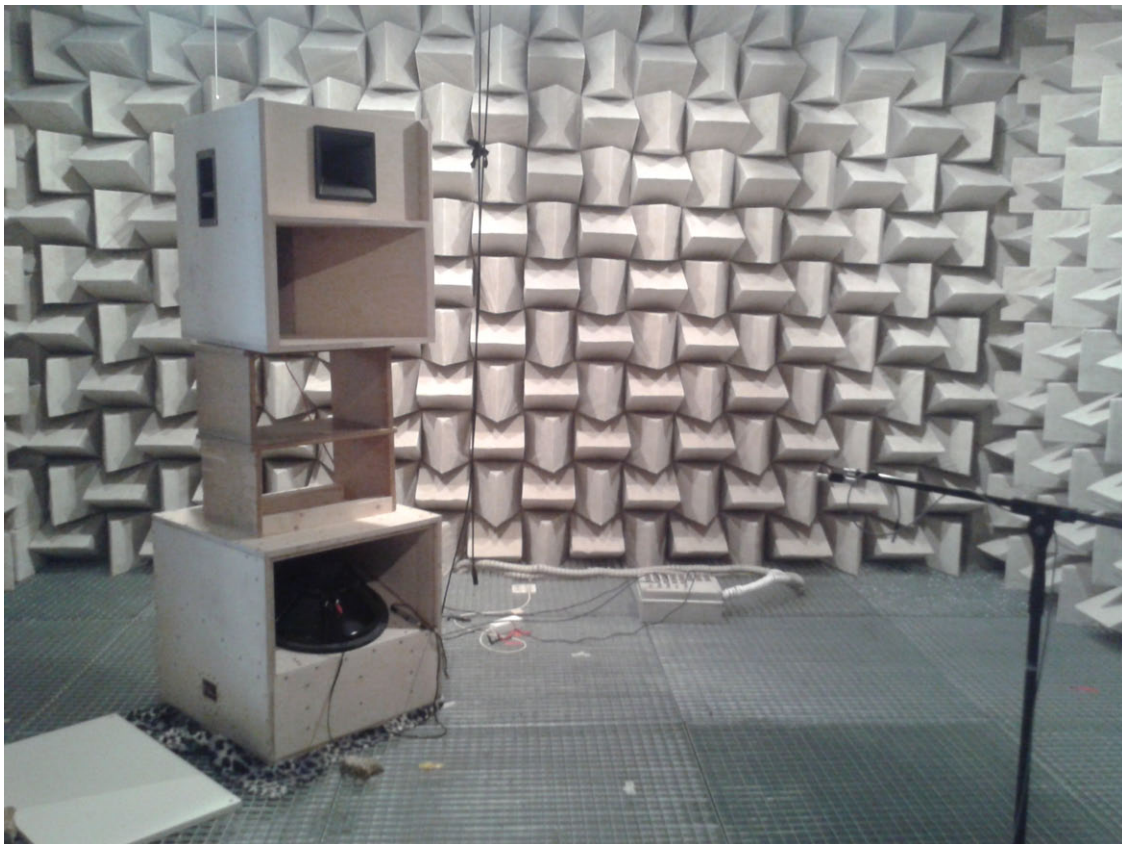


Figura 16. Foto de la disposición del sistema de sonido en la posición final sobre la que se han realizado las medidas del sistema completo.

5.1. Filtrado

En un filtrado ideal es importante que se produzca un reparto equitativo del espectro de audio, siguiendo esta teoría las frecuencias de cruce f_1 y f_2 para un sistema de 3 vías sería: $f_1 = 201\text{Hz}$ y $f_2 = 2031\text{Hz}$, así el espectro de audio quedaría repartido equitativamente entre las 3 vías. No obstante, esto solo sería factible si los altavoces de nuestras 3 vías fuesen completamente planos. Como esto no es así será necesario estudiar la respuesta en frecuencia de cada una de las vías por separado, y a partir de ahí establecer en que rango de frecuencias actuará cada una. Haciendo coincidir los puntos de cruce de los filtros con aquellas zonas en el espectro.

5.1.1. Elección del tipo de filtro

El filtrado del sistema se realizará mediante filtros activos digitales incluidos en el procesador, tales como: Linkwitz-Riley (L-R)12, Bessel (BES)12, Butterworth (BUT) 12, L-R24, BES24, BUT 24, L-R48, BES48, BUT48.

Veamos algunas características de cada filtro:

Linkwitz-Riley: desde el punto de vista del módulo, en su punto de corte produce una atenuación de 6dB por lo tanto en condiciones ideales la respuesta en amplitud del filtro sería plana siempre y cuando utilicemos el mismo filtro en las dos vías. En cuanto a la fase utilizando un filtro de 4º orden (24dB/oct), esta nos produce un desfase de 180º, teniendo en cuenta que en la otra vía obtendremos otros 180º de desfase, el resultado final será de 0º. Esto es una ventaja trabajando en sistemas ideales, en un sistema como el nuestro donde tanto la respuesta en modulo y fase no lo son no se nos asegura que después de filtrar con un L-R la respuesta en amplitud y fase sean perfectas.

Butterworth: es el único filtro que mantiene su forma para órdenes mayores, sigue aumentando la pendiente pero no cambia su forma, la respuesta en frecuencia es completamente plana. Por el contrario a todo esto su respuesta en fase no lo es, las señales deben estar en cuadratura (diferencia de 90º) o aplicar una corrección de fase después de aplicar el filtro.

Bessel: Están diseñados para tener una fase lineal en las bandas pasantes, por lo que no producen distorsión de fase, por el contrario tienen una mayor zona de

transición entre las bandas pasantes lo que no es conveniente debido a las cancelaciones que puede sufrir la respuesta final.

En general la elección del tipo de filtro [6] es una elección de compromiso entre una transición más lenta y una mejor respuesta en fase lo que se da con órdenes de filtros bajos y pendientes más abruptas que producen transiciones rápidas pero dan lugar distorsiones de fase.

El oído humano es mucho más sensible a la amplitud de una señal que a los posibles errores de fase que se puedan ocasionar por ello hemos centrado nuestros esfuerzos en obtener una transición entre vías rápida obteniendo así una respuesta lo más plana posible en amplitud.

Elegimos finalmente un Linkwitz Riley de 24dB/oct. Elegimos 24dB/oct sin llegar a los 48dB/oct para respetar los errores de fase que pudiesen surgir, ya que con esta pendiente era suficiente para una transición rápida entre vías. L-R nos da un incremento en el punto de corte de los filtros de 0dB por lo que la elección de las frecuencias de corte se hizo donde ambas señales tenían un solapamiento mayor, y sus niveles eran lo más parecido posible.

5.1.2. Elección de las frecuencias de cruce

Para elegir la frecuencia de cruce entre dos vías debemos estudiar por separado las respuestas en frecuencia de cada vía, para así poder determinar cuales son las zonas óptimas de funcionamiento de cada una y ver en que frecuencias tienen un solapado mayor.

En la figuras 17 y 18 se muestra la elección de dos frecuencias de cruce diferentes y como ésta hace variar la respuesta del sistema completo.

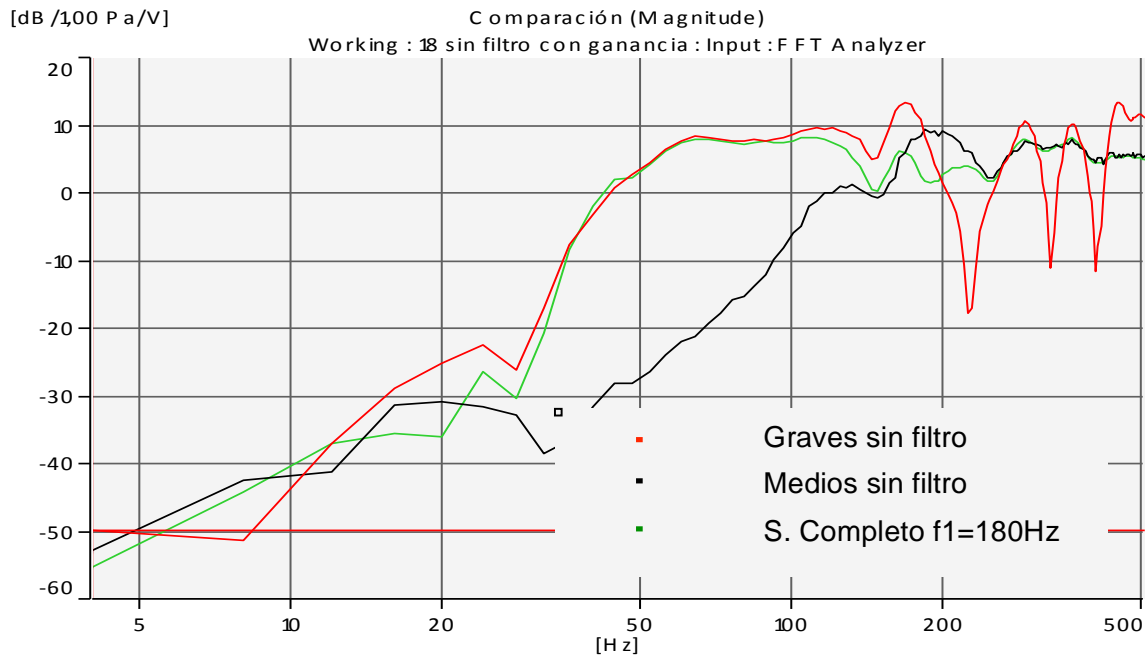


Figura 17. (Rojo) Vía de graves sin filtro, (Negro) vía de medios sin filtro, (Verde) Sistema completo con $f_1=180\text{Hz}$

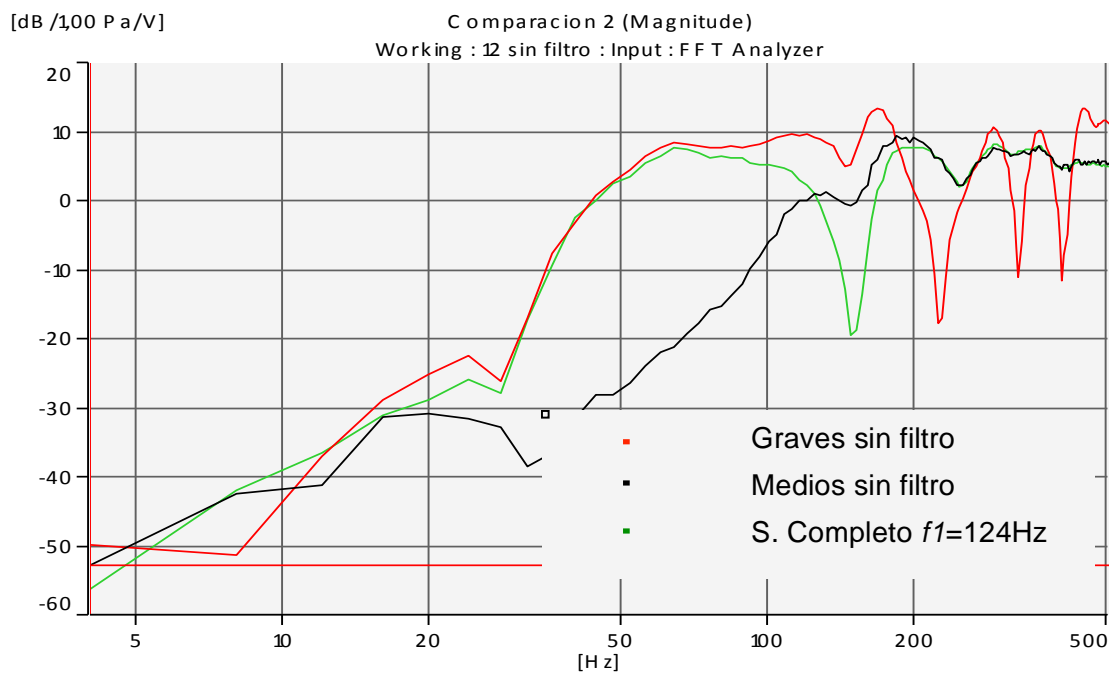


Figura 18. (Rojo) Vía de graves sin filtro, (Negro) vía de medios sin filtro, (Verde) Sistema completo con $f_1=124\text{Hz}$

Según la respuesta de nuestro altavoz de graves, se ha decidido eliminar todas las cancelaciones a partir de los 200Hz, además de esto vemos como a partir de los 180Hz la respuesta en frecuencia comienza a caer de forma pronunciada, por ello parece ser una frecuencia óptima para el corte.

Desde el punto de vista de los medios no es hasta a partir de los 180Hz cuando comienza a estabilizarse la respuesta, por lo que desde este punto de vista también parece una frecuencia adecuada para realizar el corte.

Por realizar un análisis comparativo se ha escogido también como opción $f_1=124\text{Hz}$, con la intención de evitar las irregularidades en la respuesta de los graves a partir de este punto como puede observarse en la figura 18. Además por otra parte la respuesta en medios alcanza ya cierto nivel aunque no se haya estabilizado por completo.

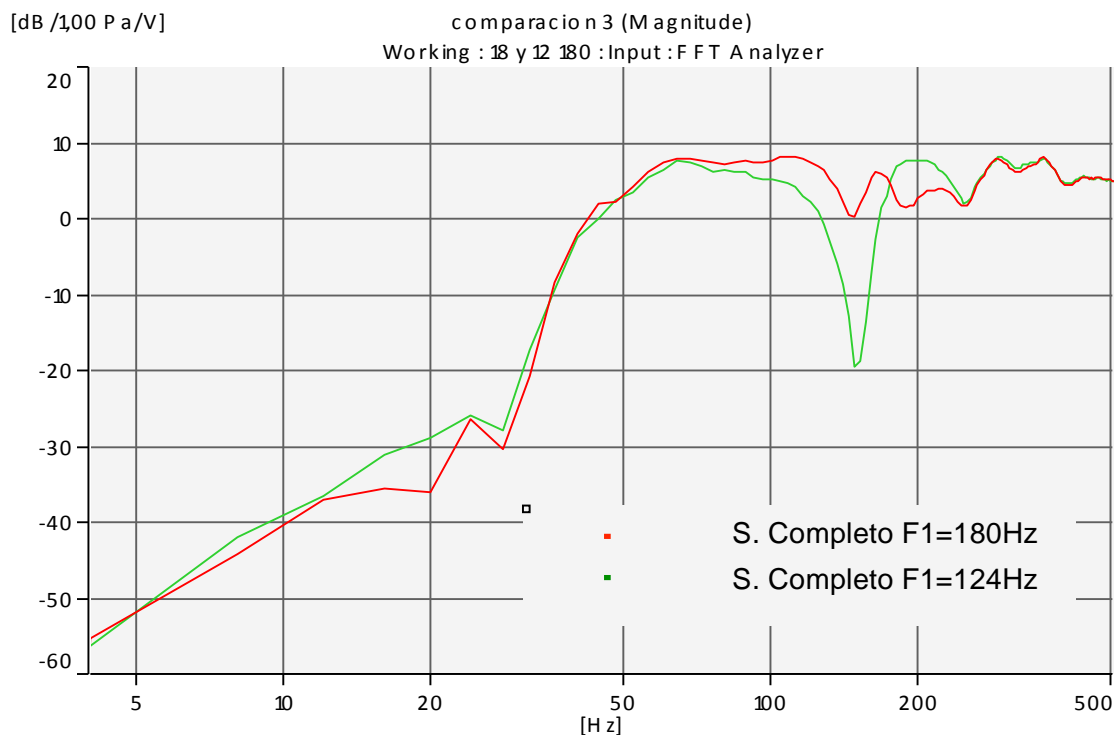


Figura 19. (Rojo) sistema completo para $f_1=180\text{Hz}$, (Verde) Sistema completo para $f_1=124\text{Hz}$.

Como vemos en la figura 19 hay una gran diferencia en la elección de una frecuencia de cruce u otra. Para $f_1=124\text{Hz}$ aparece una gran cancelación, por el contrario la respuesta en torno a los 200Hz mejora.

Para elegir la frecuencia de cruce entre la vía de medios y agudos se ha seguido el mismo procedimiento, a partir de la respuesta de las dos vías en la figura 20, se ha situado la frecuencia de cruce en los 859Hz. Como vemos los modos y cancelaciones debidos al efecto de la bocina en el altavoz de medios hace que la amplitud de la respuesta baje en torno a 1Khz y comience a oscilar dejando de ser plana a partir de este punto. La vía de agudos comienza a tener un comportamiento mas o menos plano en torno a los 800Hz. La zona de solapado de las respuestas en frecuencia de ambas vías es escasa por lo que no hemos tenido muchos puntos donde elegir la frecuencia de corte, en este sentido nos hemos visto bastante limitados. Se probó con otros puntos de corte, dando como resultado cancelaciones mucho más graves que no terminaban de ser corregidas mediante retardos.

En un principio se pretendía que el altavoz de medios radiase hasta 1Khz, ya que es una frecuencia importante y la calidad del cono es mayor que el motor de agudos. No obstante no ha sido un problema ya que el motor llega a reproducir 1Khz sin forzar. No obstante en un futuro se estudiará como aplicar un refuerzo en estas frecuencias.

La elección de la frecuencia de cruce ha sido $f_2=859\text{Hz}$, el valle que se observa en la figura 20 es debido a un problema de cancelación de fase como se verá en el apartado 5.3.1.

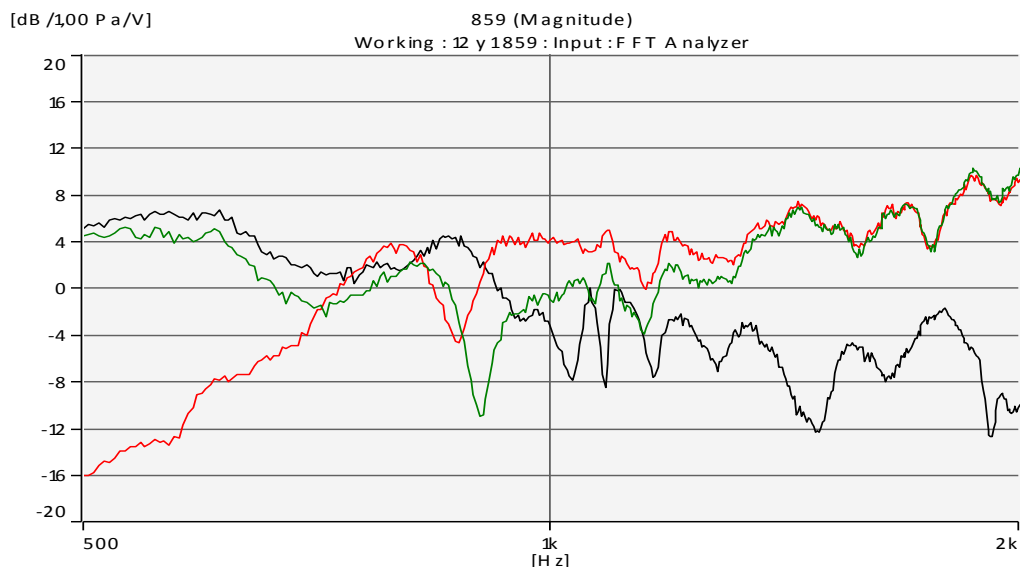


Figura 20. (Rojo) Vía de agudos sin filtro, (Negro) vía de medios sin filtro, (Verde) Sistema completo con $f_2=859\text{Hz}$

En la figura 21 se observan las 3 vías filtradas mediante Linkwitz-Riley con pendiente de 24dB en $f_1=180\text{Hz}$ y $f_2=859\text{Hz}$. Aunque parece que el punto de cruce f_2 no ha sido correctamente elegido debido al gran valle entre las dos vías veremos en 5.3.1 como con la corrección de fase este problema desaparece.

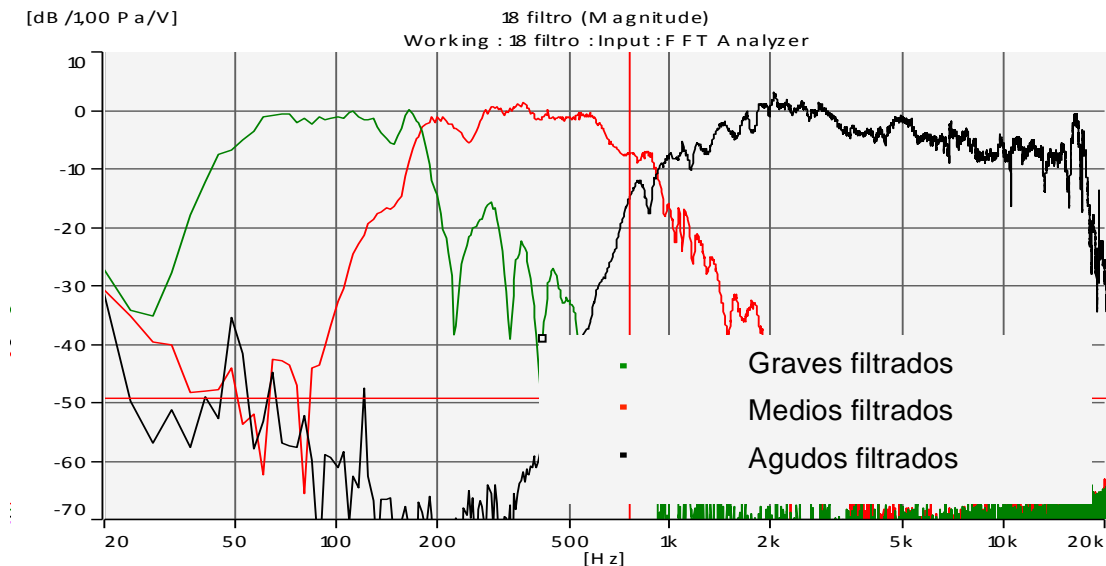


Figura 21. (Verde) Vía de graves filtrada, (Rojo) vía de medios filtrada, (Negro) vía de agudos filtrada

5.1.3. Alineamiento de fase

Una vez elegidas dos posibles frecuencias de cruce de los filtros vamos a estudiar la fase relativa a cada frecuencia de cruce elegida y ver si realmente existe algún desfase que podamos corregir mediante retardos.

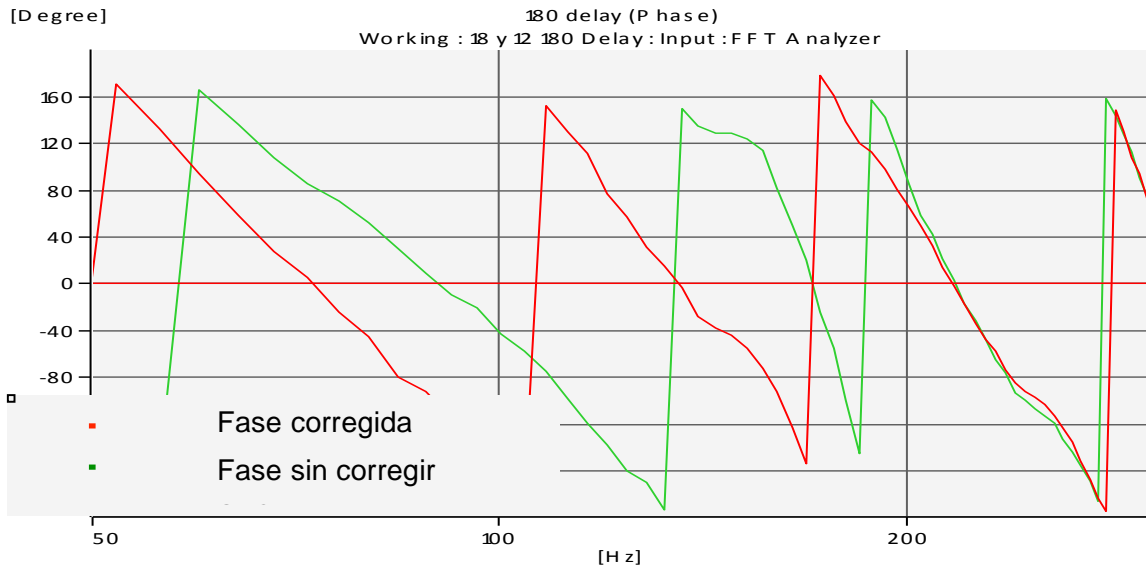


Figura 22. (Verde) respuesta en fase del sistema para $f_1=180\text{Hz}$ sin retardo, (Rojo) respuesta en fase del sistema para $f_1=180\text{Hz}$ con retardo (3,35ms)

Como vemos en la figura 22 existe una anomalía en la fase del sistema en torno a la frecuencia de cruce del sistema.

Para corregir el resto de fases hemos optado por retrasar todas las vías 20,09ms para así poder “adelantar” la señal de cualquiera de ellas, y lo más importante modificar el retardo de la vía de graves y la de agudos, dejando así la de medios intacta. De otra forma si retardamos la señal de medios respecto a la de graves por ejemplo, también estaríamos moviendo la fase de ésta respecto a la de agudos, lo que nos supondría tener que volver ajustar de nuevo estas dos.

Para ajustar la fase nos hemos fijado en la respuesta en módulo del sistema, variando el retardo de cada vía y comparando la señal retardada con la original (figura 23), hasta obtener una respuesta lo más plana posible. El retardo introducido es de 3,35ms (23,44ms a partir de los 20,09ms que tiene el sistema entero). Este sistema de ajuste que a priori puede parecer tedioso se convierte en algo rápido y gracias al procesador que nos permite variar estos retardos en tiempo real.

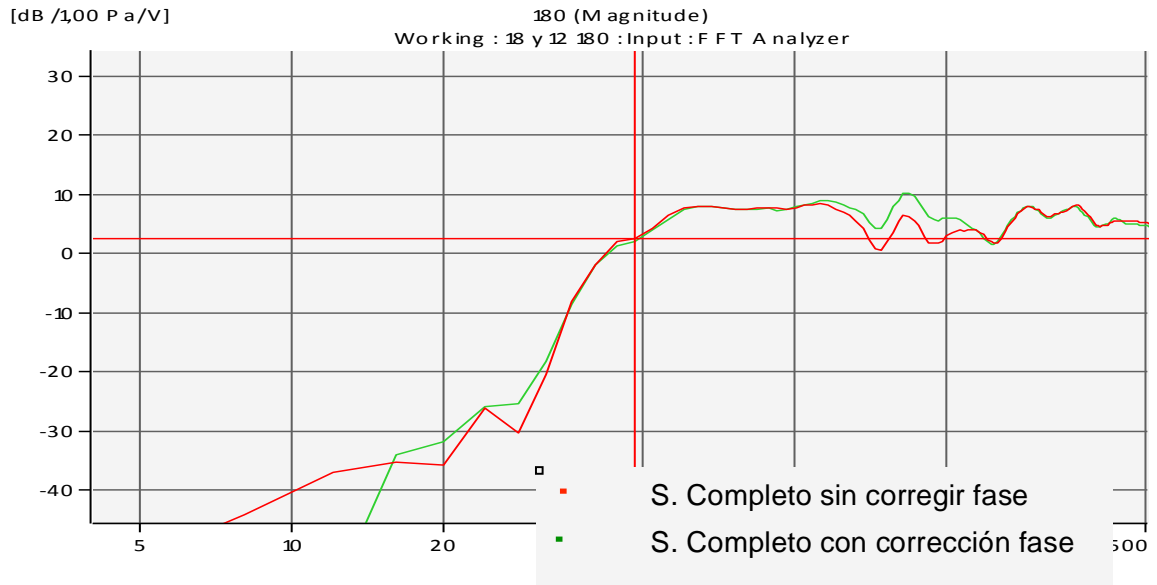


Figura 23. (Rojo) respuesta del sistema para $f_1=180\text{Hz}$ sin retardo, (Verde) respuesta del sistema para $f_1=180\text{Hz}$ con retardo (3,35ms).

La respuesta obtenida tras el ajuste de fase sigue siendo parecida, simplemente ganamos algo de nivel entre los 150 Hz y 200Hz. Lo que nos da a entender que no había tantos problemas de fase. En la figura 24 se ve el mismo procedimiento para $f_1=124\text{Hz}$.

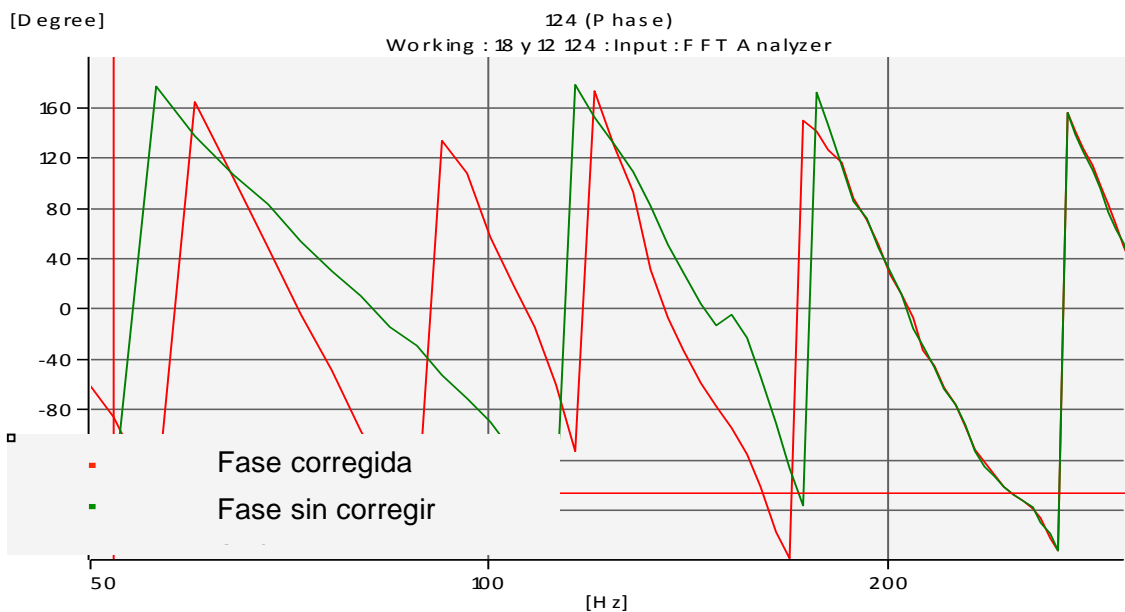


Figura 24. (Verde) respuesta en fase del sistema para $f_1=124\text{Hz}$ sin retardo, (Rojo) respuesta en fase del sistema para $f_1=124\text{Hz}$ con retardo (4,08ms).

En la figura 25 se observa como el error de fase es mayor que con la frecuencia de corte a 180Hz, el error en la fase coincide con la zona donde se produce la cancelación. En este caso hemos tenido que “adelantar” la vía de graves 4,08ms (16,01ms a partir del retardo total 20,09ms).

Según se ve en el módulo de la respuesta en frecuencia del sistema corrigiendo el error de fase hemos conseguido anular prácticamente esa cancelación tan abrupta.

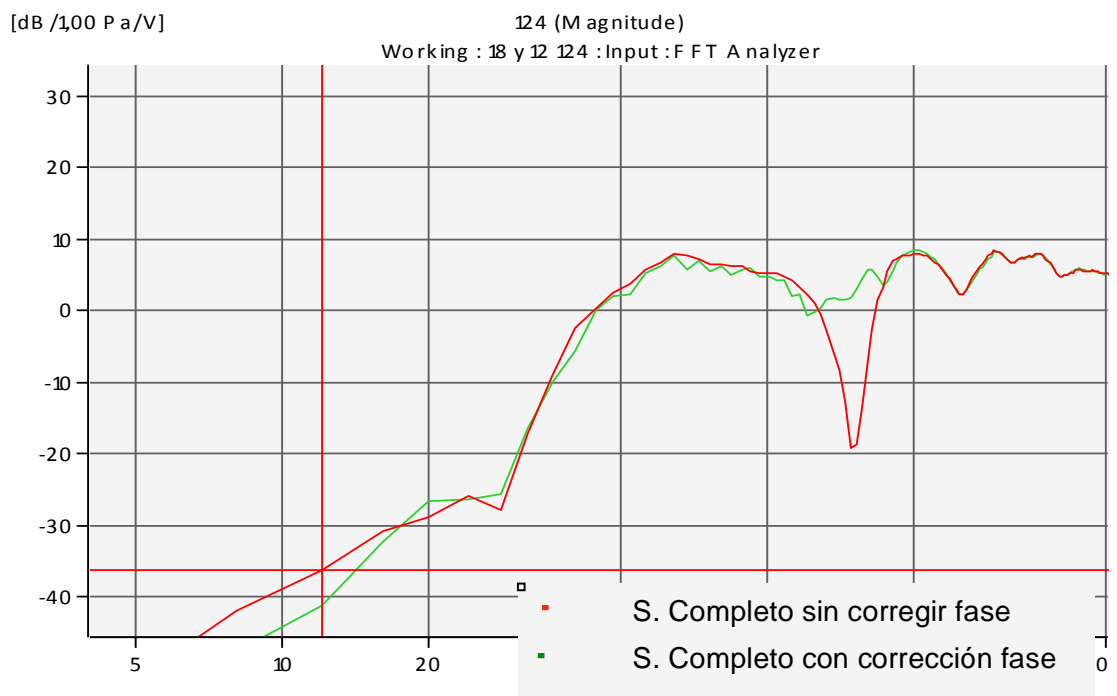


Figura 25. (Rojo) respuesta del sistema para $f_1=124\text{Hz}$ sin retardo, (Verde) respuesta del sistema para $f_1=124\text{Hz}$ con retardo (4,08ms).

Como vemos la importancia de corregir la fase cuando el punto de corte está en 124Hz es mucho más importante que cuando elegimos los 180Hz como punto de cruce.

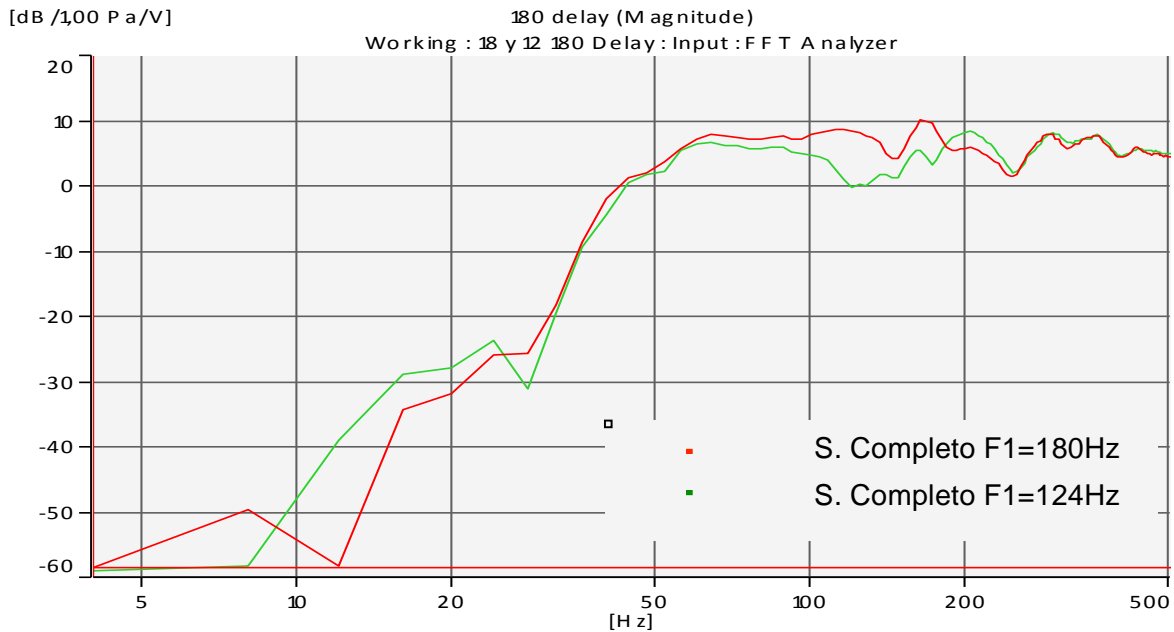


Figura 26. (Rojo) respuesta del sistema para $f_1=180\text{Hz}$ después del ajuste, (Verde) respuesta del sistema para $f_1=124\text{Hz}$ después del ajuste.

Aún corrigiendo la fase para ambas frecuencias de cruce la respuesta final varía. Con un $f_1=180\text{Hz}$ la respuesta obtenida es algo más plana y sobre todo mantiene el nivel de graves hasta los 150 Hz, por el contrario perdemos algo de nivel en los 200Hz.

En la figura 26 vemos la respuesta del sistema para $f_2=859\text{Hz}$. Como vemos existe una cancelación justo en f_2 que se corrige añadiendo un retardo de 0,43ms (20,52ms a partir de los 20,09ms que tiene el sistema entero). Es de esperar que debido a que estamos trabajando en frecuencias más altas y por lo tanto con longitudes de onda más pequeñas la corrección de fase se produzca utilizando retardos mucho menores que en f_1 .

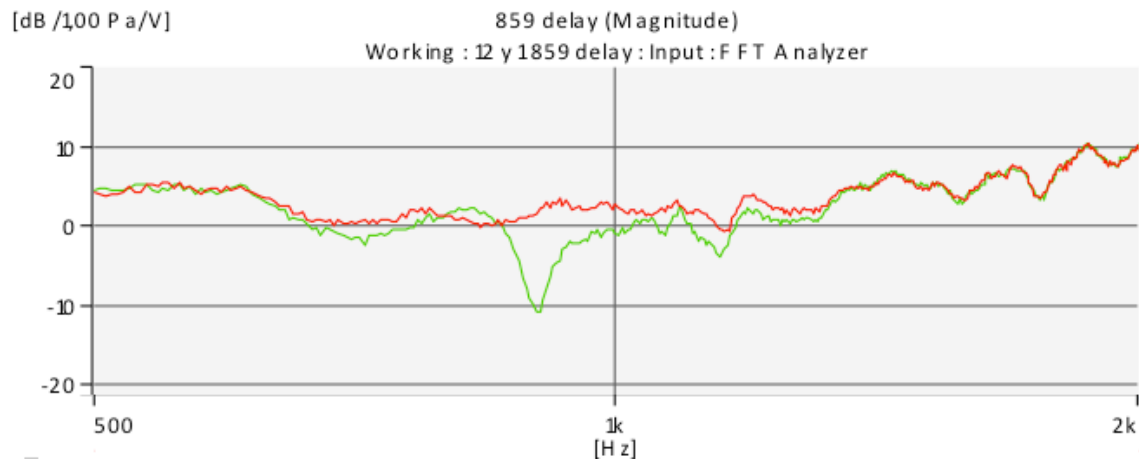


Figura 27. (Verde) respuesta del sistema para $f_2=859\text{Hz}$ antes del ajuste, (Rojo) respuesta del sistema para $f_2=859\text{Hz}$ con retardo (0,43ms).

5.1.4. Ecualización

Una vez seleccionadas las frecuencias de cruce f_1 y f_2 , y corregidos los problemas de fase como podemos observar en la figura 28 gráfica roja, existe una disminución del módulo en la respuesta total del sistema entre los 500Hz y 2K, debido a la falta de solapamiento entre la vía de medios y agudos. Además a partir de los 3K en nuestra vía de agudos comienza una pendiente que termina por reducir su nivel 10dB en torno a los 10K.

Haber utilizado un procesador digital nos va a permitir optimizar el sistema. Nuestro procesador nos permite incorporar un ecualizador un paramétrico y otro dinámico para cualquiera de las 3 entradas o cualquiera de las 6 salidas de forma independiente. Para corregir el problema que surge en torno a f_2 utilizaremos la ecualización paramétrica a la entrada pues en f_2 trabajan tanto la vía de medios como la de agudos, ecualizando la salida de cada una por separado consumiríamos más recursos del procesador ya que utilizaríamos dos filtros en vez de aplicar uno solo a entrada.

Para solucionar el problema hemos aplicado un filtro de ganancia positiva $G=6,5\text{dB}$ a una frecuencia $f=937\text{Hz}$ y con un factor de calidad $Q=2$. En figura 28 podemos observar el resultado de esta corrección.

El problema que aparece a partir de los 3K a diferencia del que aparece en f_2 es debido únicamente a la vía de agudos por lo tanto aplicaremos dicho filtro solo a esta salida. En la figura 28 podemos ver como solucionamos el problema aplicando un filtro paso alto con pendiente de 12dB, a partir de los 4,11K y con una ganancia positiva $G=9,7\text{dB}$.

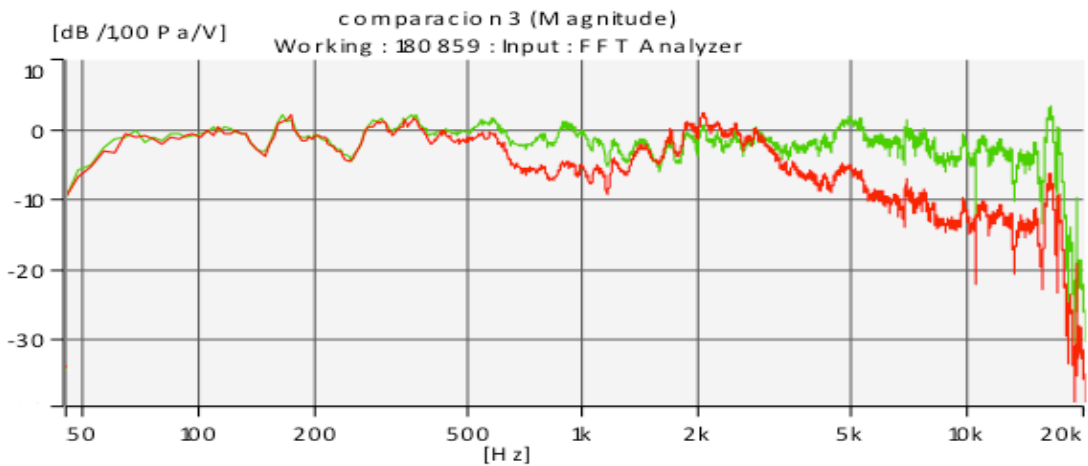


Figura 28. (Rojo) respuesta del sistema sin ecualizar, (Verde) respuesta del sistema ecualizado.

En la gráfica se ve la comparación del sistema una vez optimizado donde se ve la importancia de la ecualización.

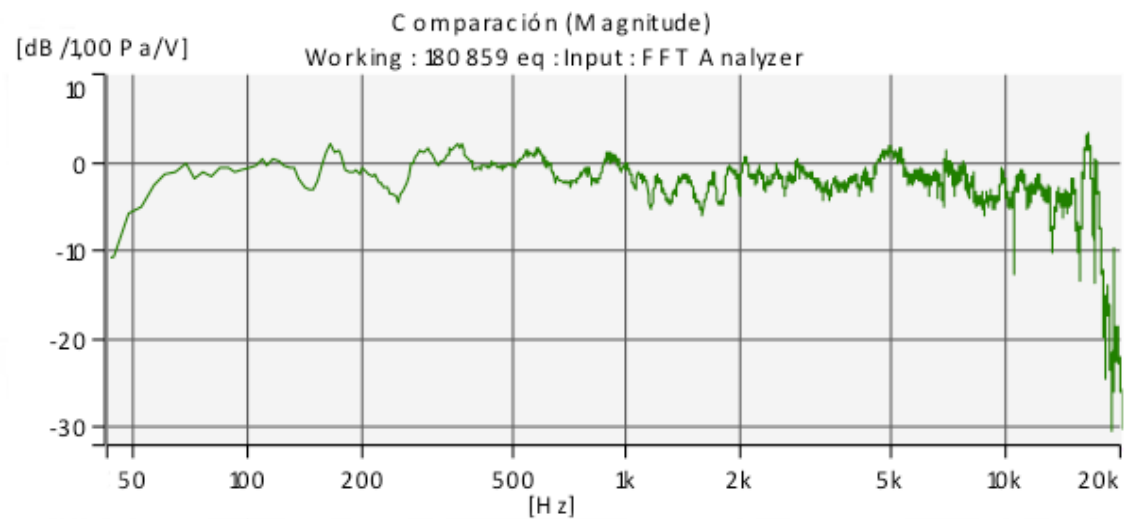


Figura 29. Respuesta final del sistema.

En la figura 29 podemos observar la respuesta final del sistema, existe una notable diferencia después de corregir las fases y ecualizarlo.

6

Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

La finalidad de este proyecto es la construcción y optimización de un sound system de 3 vías que será utilizado por la asociación *MCL*, para diferentes tipos de eventos. El proyecto comenzó con la construcción de una caja de graves Cubo 18, y otra caja con dos unidades de medios-agudos MT-130, Una vez construidas se pasó a la fase de medida y optimización de las mismas. Se ha medido cada caja por separado, estudiando el comportamiento de cada una identificando cuales son los principales factores que afectan a su repuesta final como el uso de material absorbente, el efecto final de la bocina o la posición del cono. Una vez caracterizada cada caja se procedió a la caracterización del sistema completo mediante un procesador encargado de controlar diferentes parámetros como las frecuencias de cruce, filtros, ecualización o la asignación de retardos. Se han probado varias frecuencias y diferentes filtros hasta dar con una respuesta óptima

El haber construido las cajas de forma manual nos ha reportado una gran cantidad de conocimientos sobre el comportamiento acústico de la madera, y de cómo llevar a cabo la construcción de una forma u otra afecta al comportamiento final de la caja.

Durante la construcción de las cajas hablamos con muchos profesionales del sector que nos transmitieron sus impresiones y consejos los cuales han sido plasmados en el proyecto y que sin duda han hecho de la construcción en sí una de las partes más didácticas de este proyecto. El tiempo de construcción de la primera caja de graves comparado con el tiempo invertido en construir los dos MT-130 ha sido mucho mayor tratándose de un modelo mucho más simple, esto es debido a la falta de práctica con los materiales conceptos acústicos y experiencia en general. Lo que muestra una adquisición de conocimiento y práctica importante que sin duda ya han convertido en algo mucho más rentable la construcción de estas cajas. Por otra parte la exclusividad de un sistema auto construido, y la apariencia externa frente al público es también un aspecto a tener en cuenta con el que de otra manera no hubiésemos podido contar.

Tras las medidas realizadas y mediante la escucha de la caja de graves, esta tiene un sonido limpio y con una buena respuesta a transitorios. Aunque su funcionamiento

final no es el de un modelo de bocina plegada si no que se asemeja más al de un bass réflex. En lo que respecta a la proporción tamaño, peso y respuesta su funcionamiento no tiene nada que envidiar a otros modelos de subgraves de un volumen mucho más grandes y pesados. Sin duda ha sido una buena elección habernos decantado por este modelo. No obstante todavía tenemos en mente construir otras tres unidades coincidiendo con la realización de los talleres para los que ha servido de base este proyecto. Durante estos talleres se experimentará ampliando la longitud de la bocina plegada de dicho modelo, intentando llegar a los 40Hz.

En cuanto a la caja de medios-agudos, ha supuesto una complicación mayor en la construcción que el Cubo 18, pero sin duda solo por su respuesta en campo lejano ha merecido la pena su construcción y tiempo dedicados. Como objeción a este modelo de caja y/o cono resaltaría que si la parte de medios no llega alcanzar los 1000Hz, como en un principio se esperaba para futuras construcciones se estudiará sustituir el motor de 1" por otro de 2" que abarque más cómodamente el rango de frecuencias de trabajo.

En cuanto al sistema medido, en relación al volumen y peso total, tiene una respuesta más que aceptable teniendo en cuenta que es un sistema que permite colocarse en cualquier sala por pequeña que sea y que se puede montar y desmontar entre dos personas de una forma fácil y rápida. El hecho de que no haga falta una furgoneta para mover el equipo es una de las metas que como *MCL* nos habíamos propuesto y hemos cumplido.

6.2. Líneas Futuras

Aunque para el proyecto solo se han incluido dos cajas, en líneas futuras se pretende ampliar el sound system, hasta un total de 6 cajas incluyendo una cuarta vía. No obstante esto se sale de los objetivos de *MCL*, pero teniendo los medios necesarios vemos importante seguir investigando en este campo y sobre todo llegar a tener un sound system verdaderamente grande que nos permita dividirse en otros sistemas más pequeños independientes como el estudiado en el proyecto en función del tipo de sonorización que se demande.

Otra de las líneas que quedan pendientes, es un estudio pormenorizado de los diseños cajas de graves basados en modelos de bocina plegada y sus verdaderas respuestas. Investigando sobre el funcionamiento de nuestra caja de graves hemos

encontrado numerosa información de cómo los sistemas de simulación no son nada fiables sobre el verdadero funcionamiento de estos sistemas una vez construidos.

A raíz de este proyecto y teniendo en cuenta el circuito internacional de sound systems artesanales que cada año va creciendo en nuestro país[9], se ha invitado ya a muchas de estas soundsystems hacer una inter-comparación de todas sus cajas de graves que incluyen este sistema. Y que se espera concluir para la siguiente edición del *Encuentro Internacional de Música "WIM2015"*.

7 Planos

7.1. Planos y vistas del Cube18

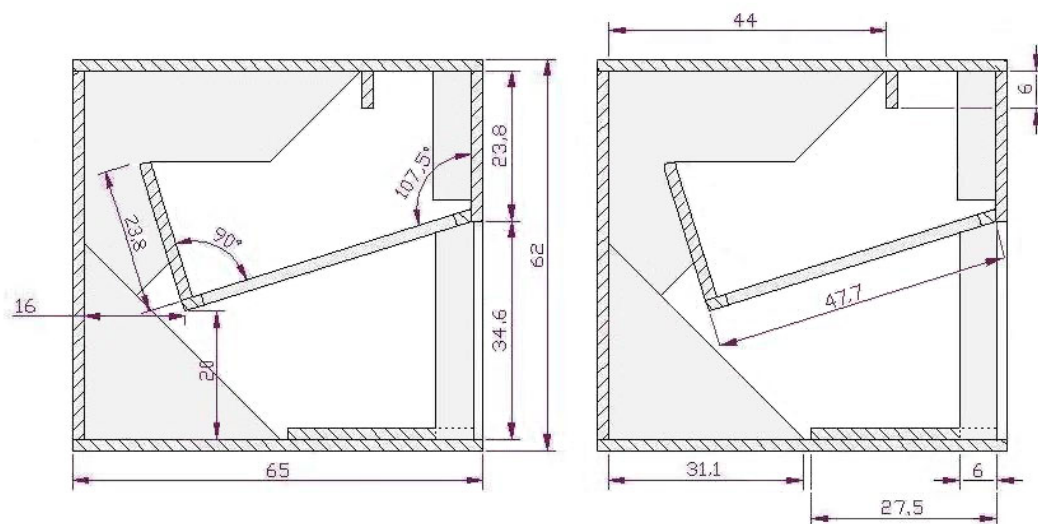


Figura 30. Planos a partir de los que se realizó Cube 18, medidas en cm.

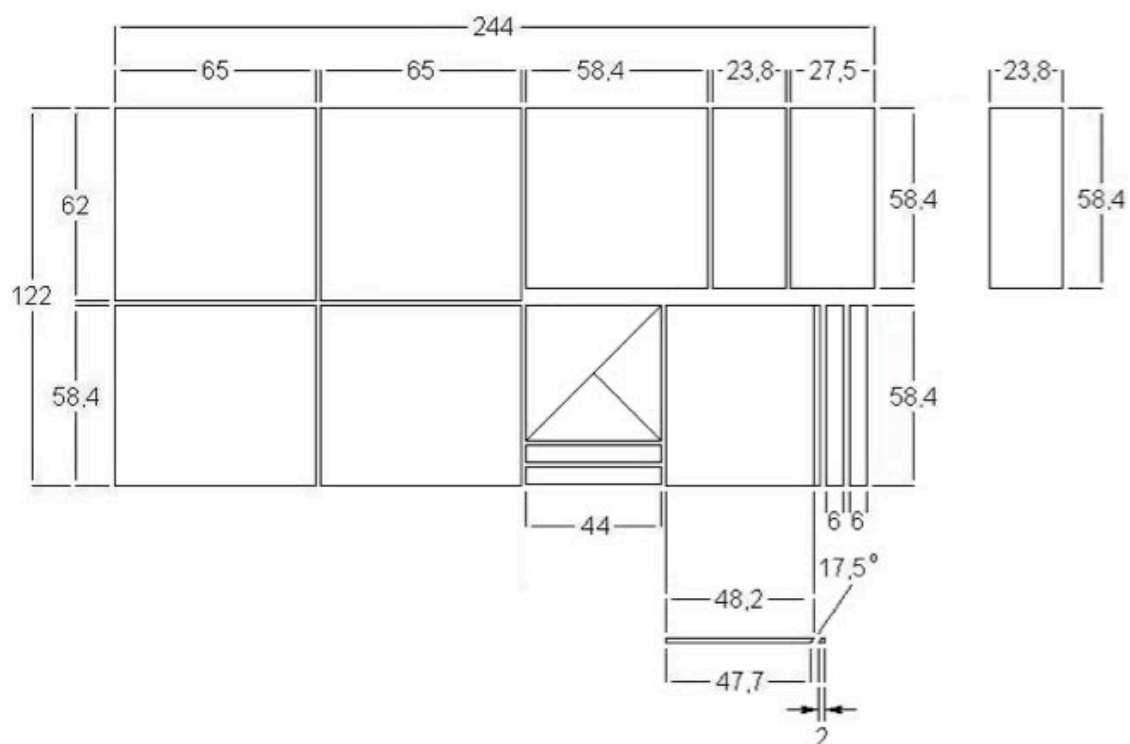


Figura 31. Despiece Cube 18, medidas en cm.

7.2. Planos y vistas MT-130

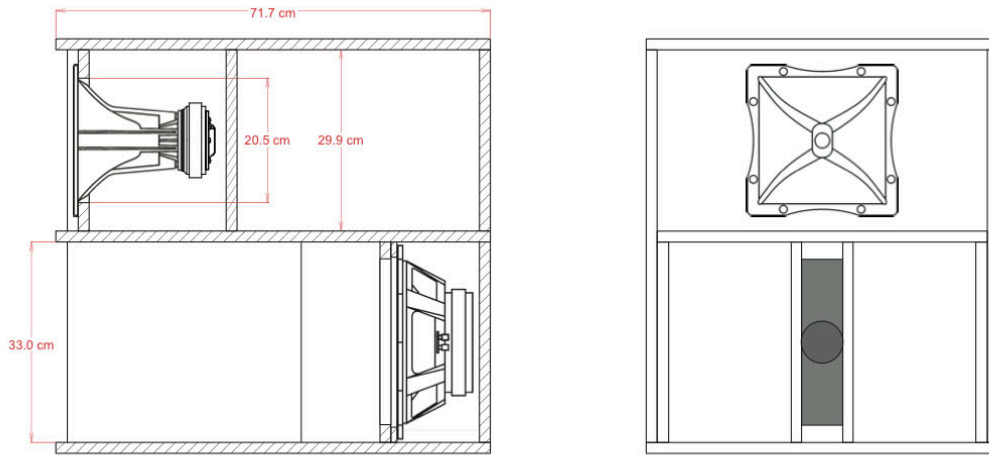


Figura 32. Diferentes vistas MT-130

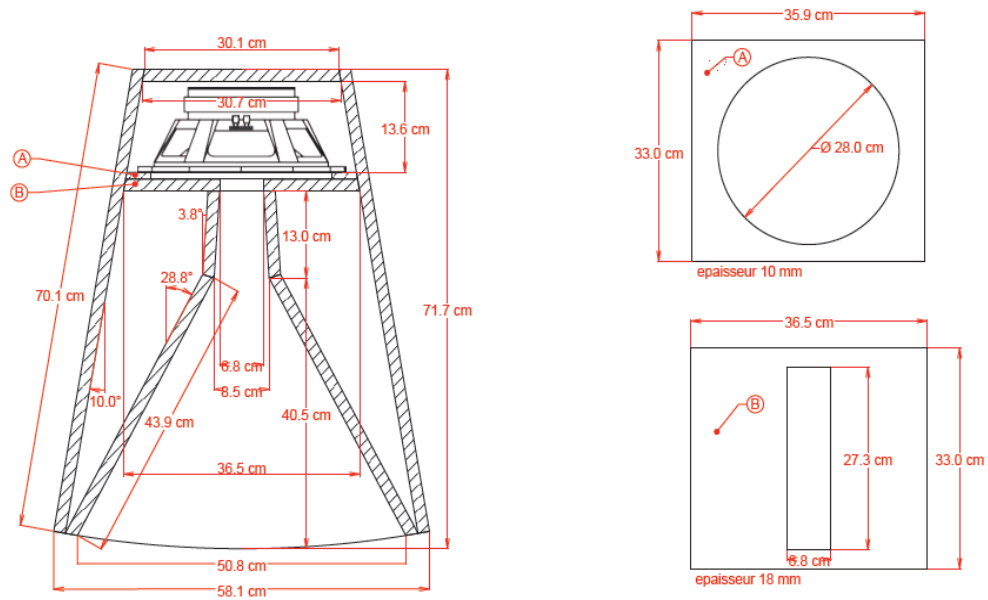


Figura 33. Planos MT-130

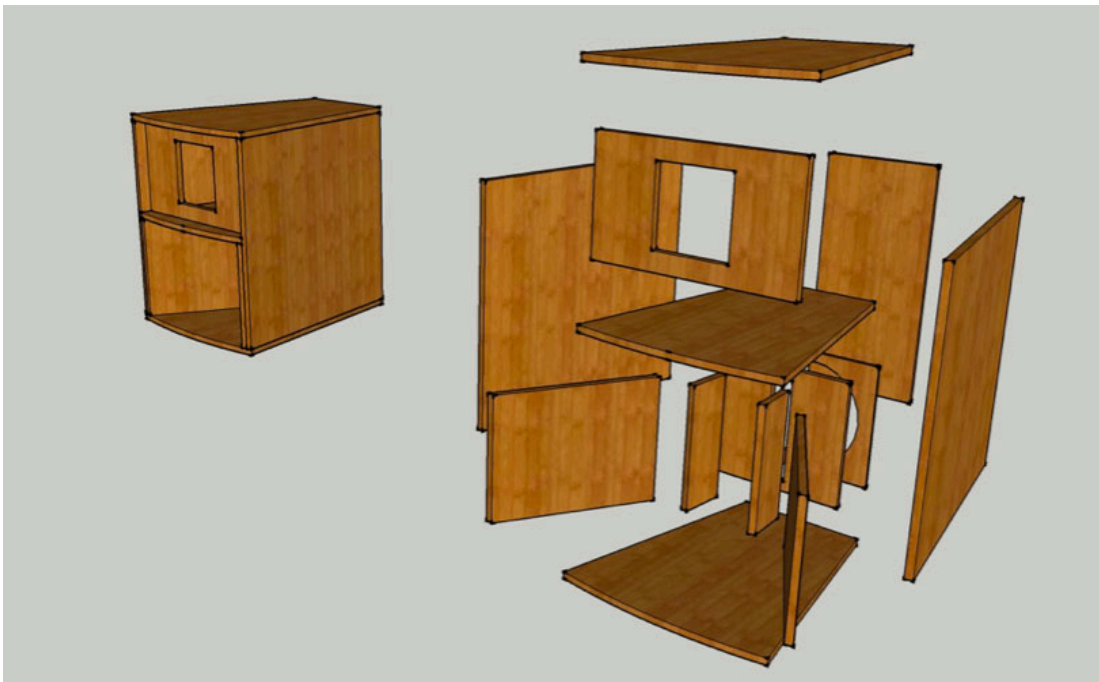


Figura 34.Despiece en Sketchup MT-130

7.3. Coste del Material

Cubo 18

Beyma 18p80Nd	250€
Tablon (2,5x1,25)m + Cortes	98€
Materiales (pegamento, tornillos, cola, conectores...)	35€
Total	383€

M-T130

Precision Devices 121	143€
Beyma Cd10Fe	44€
Beyma TD164	23€
Tablon (2,5x1,25)m + Cortes	98€
Materiales (pegamento, tornillos, cola, conectores...)	35€
Total	343€

Referencias bibliográficas

- [1] www.wim2014.com
- [2] BBC Books, Lloyd Bradley ,“Reggae The Story of Jamaican Music”, 2001
- [3] <http://hornplans.free.fr/>
- [4] <http://www.freespeakerplans.com/forum/38-hosted-plans/9733-cubo-18>
- [5] <http://www.freespeakerplans.com/forum/38-hosted-plans/11940-cubo-sub>
- [6] <http://www.pcpaudio.com>
- [7] “Active Crossover Networks for Noncoincident Drivers”, S. Linkwitz, Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 24 No. 1, January/February 1976.
- [8] “Sistemas de altavoces en cajas bass reflex”,Richard H. Small, School of Electrical Engineering, The University of Sydney, 2006
- [9] <http://www.4manarmy.org/sound-system-map.html>
- [10] Jose Luis Sánchez Bote, “Altavoces,: características, filtros de cruce y bocinas”, Escuela Universitaria Politécnica de Madrid, 2006
- [11] Jürg Jecklin, “Lautsprecherbuch” (Frankh’sche Verlagshandlung W. Kellrt & Co., Suttgart /1967)